



ESTUDO DE DESCARGAS PARCIAIS EM ISOLAMENTO DE MÁQUINAS ELÉTRICAS USANDO O MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

Rodrigo Sousa Ferreira

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Antônio Carlos Ferreira.

Rio de Janeiro
Fevereiro de 2017

ESTUDO DE DESCARGAS PARCIAIS EM ISOLAMENTO DE MÁQUINAS
ELÉTRICAS USANDO O MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

Rodrigo Sousa Ferreira

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO
LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE)
DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM
CIÊNCIAS EM ENGENHARIA ELÉTRICA.

Examinada por:

Prof. Antônio Carlos Ferreira, Ph.D.

Prof. Rubens de Andrade Júnior, D.Sc.

Prof. José Andrés Santisteban Larrea, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

FEVEREIRO DE 2017

Ferreira, Rodrigo Sousa

Estudo de Descargas Parciais em Isolamento de Máquinas Elétricas usando o Método dos Elementos Finitos/ Rodrigo Sousa Ferreira. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2017.

XVI, 107 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Antônio Carlos Ferreira

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Elétrica, 2017.

Referências Bibliográficas: p. 103-107.

1. Descargas Parciais. 2. Método dos Elementos Finitos. 3. Isolamento de Máquinas Elétricas. I. Ferreira, Antônio Carlos. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Elétrica. III. Título.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela vida, pela saúde, pelo Seu amor e por todas as bênçãos e oportunidades, incluindo este trabalho.

À minha esposa, pelo inquestionável apoio e incentivo, confiança, companheirismo e por compreender o tempo dedicado a este trabalho.

À toda minha família, e em especial à minha mãe, pelo amor, pelos sábios conselhos e pelo apoio incondicional, e ao meu irmão por sua amizade e companheirismo em todos os momentos.

Ao Professor Antônio Carlos Ferreira pela orientação neste trabalho.

Aos Professores membros da banca examinadora pela contribuição na melhoria deste trabalho.

A todos os meus amigos por todos os ensinamentos.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

ESTUDO DE DESCARGAS PARCIAIS EM ISOLAMENTO DE MÁQUINAS ELÉTRICAS USANDO O MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

Rodrigo Sousa Ferreira

Fevereiro/2017

Orientador: Antônio Carlos Ferreira

Programa: Engenharia Elétrica

Descargas parciais são descargas internas ao isolamento causadas por imperfeições que surgem durante o processo de fabricação ou por deterioração normal do isolamento. A repetição de descargas parciais pode levar à degradação do isolamento levando-o a falhar. Em bobinas de média tensão a monitoração de descargas parciais é uma ferramenta importante para o acompanhamento da condição do isolamento de motores e geradores como forma de tentar prever se o isolamento está próximo ou não de falhar. O entendimento do fenômeno de descargas parciais é um importante passo inicial para que possam haver diagnósticos cada vez mais assertivos no acompanhamento da vida do isolamento de máquinas elétricas. Neste contexto, este trabalho objetiva estudar o fenômeno de descargas parciais utilizando um modelo via elementos finitos, já apresentado anteriormente, no isolamento de uma bobina estatórica de 13,8 kV com uma cavidade interna em sua isolação principal. O objetivo principal do trabalho é verificar a influência de certos parâmetros nos resultados. Desta forma, são feitas simulações alterando parâmetros, tais como, raio, geometria e posição da cavidade, amplitude da tensão aplicada, espessura da isolação principal da bobina e temperatura inicial da geometria.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

PARTIAL DIRCHARGE STUDY IN ROTATING ELECTRICAL MACHINES
INSULATION USING FINITE ELEMENTS METHOD

Rodrigo Sousa Ferreira

February/2017

Advisor: Antônio Carlos Ferreira

Department: Electrical Engineering

Partial discharges are internal discharges in the insulation system caused by imperfections during the manufacturing process or by regular insulation deterioration. The repetition of partial discharges can deteriorate the insulation that can lead it to fail. In stator coils of medium voltage machines, monitoring partial discharge is a great tool for monitoring the condition of the insulation of motors and generators as a way to try to predict whether the insulation is close or not to fail. The good understanding of partial discharge phenomenon is an important first step to increase the assertive diagnosis in monitoring the life of the insulation system in electric machines. In this context, this work aims to study the phenomenon of partial discharges using a model via finite elements, which was presented previously, in the insulation of a stator coil of 13.8 kV with an internal cavity in the main insulation. The main goal of this work is to check the influence of certain parameters in the results. Thus, simulations were carried out considering variations of parameters such as size, position and geometry of the cavity, amplitude of the applied voltage, thickness of main insulation of the coil and initial temperature of the geometry.

Sumário

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Motivação	1
1.2	Objetivos	3
1.3	Metodologia	3
2	REVISÃO DA LITERATURA	5
2.1	Modelo abc Capacitivo	8
2.2	Modelo Geral para Descargas Parciais	9
2.3	Modelo utilizando Elementos Finitos	10
2.4	Apresentação dos Resultados de uma DP	11
3	DESCRIÇÃO DO MODELO UTILIZADO	13
3.1	Descarga <i>Streamer</i>	13
3.2	Campo Elétrico de Ruptura	14
3.3	Taxa de Geração de Elétrons	15
3.3.1	Emissão de Superfície	15
3.3.2	Ionização devido ao Volume da Cavidade	16
3.3.3	Probabilidade de Ocorrência da DP	17
3.4	Decaimento da Carga de Superfície	17
3.5	Elevação de Temperatura	20
3.6	Cálculo das Cargas	21
3.7	Processo de Descarga	23
3.8	Equacionamento em Elementos Finitos	27
3.9	Implementação do Modelo	29
3.9.1	Geometria	29
3.9.2	Definição dos Parâmetros de Simulação	30
3.9.3	Modelo 1 - simulação inicial	34
3.9.4	Modelo 2 - simulação considerando o atraso para início da descarga	44
3.9.5	Modelo 3 - simulação considerando o decaimento de cargas de superfície	46
4	APLICAÇÃO DO MODELO EM UMA BOBINA	53
4.1	Bobina sem Cavidade	56
4.2	Bobina com Cavidade Esférica	59
4.2.1	Caso 1: alteração da espessura da isolamento principal	69
4.2.2	Caso 2: alteração da amplitude da tensão aplicada	73
4.2.3	Caso 3: alteração da posição da cavidade	77
4.2.4	Caso 4: alteração do raio da cavidade	81

4.2.5 Caso 5: alteração da temperatura da geometria	86
4.3 Bobina com Cavidade Elipsoidal	90
4.3.1 Caso 6: alteração da geometria da cavidade	96
5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	101
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	103

Lista de Figuras

Figura 1-1: Tendência do nível de descargas parciais no estator [3].	2
Figura 2-1: Esquema de um isolante com uma cavidade [4].	5
Figura 2-2: Seção transversal de uma bobina pré-formada.	6
Figura 2-3: Esquema de camadas em uma bobina pré-formada [7].	6
Figura 2-4: Problemas em uma seção transversal de uma bobina pré-formada [11].	8
Figura 2-5: Modelo abc capacitivo [4].	8
Figura 2-6: Circuito equivalente do modelo abc capacitivo [4].	9
Figura 2-7: Exemplo de esquema de medição de descargas parciais.	11
Figura 2-8: Exemplo de gráfico PRPPPA.	12
Figura 2-9: Esquema para obtenção do gráfico PRPPPA [25].	12
Figura 3-1: Esquema de ocorrência de uma DP [4].	13
Figura 3-2: Movimento de cargas livres [4].	18
Figura 3-3: Interface entre código e método dos elementos finitos.	23
Figura 3-4: Fluxograma do código para simulação de DP.	25
Figura 3-5: Geometria cilíndrica com cavidade no centro.	29
Figura 3-6: Direções axial ($r = 0$) e radial ($z = 0$).	33
Figura 3-6: Malha para o cilindro sem cavidade.	34
Figura 3-7: Distribuição de tensão no isolante cilíndrico sem cavidade.	34
Figura 3-8: Tensão axial no isolante cilíndrico sem cavidade.	35
Figura 3-9: Campo elétrico axial no isolante cilíndrico sem cavidade.	35
Figura 3-10: Campo elétrico no centro do cilindro sem DP e tensão aplicada.	35
Figura 3-11: Malha para cilindro com cavidade.	36
Figura 3-12: Campo elétrico no centro do isolante sem ocorrência de DP.	36
Figura 3-13: Modelo 1 - forma de onda do campo elétrico no centro da cavidade.	37
Figura 3-14: Modelo 1 - campo elétrico na cavidade sem e com DP.	37
Figura 3-15: Modelo 1 - campo elétrico devido às cargas de superfície.	38
Figura 3-16: Modelo 1 - formas de onda de campo elétrico.	38
Figura 3-17: Modelo 1 - forma de onda da corrente na cavidade.	38
Figura 3-18: Modelo 1 - forma de onda de carga das DPs.	39
Figura 3-19: Modelo 1 - distribuição de campo elétrico exatamente antes da DP.	39
Figura 3-20: Modelo 1 - distribuição de campo elétrico exatamente no final da DP.	40
Figura 3-21: Modelo 1 - curvas de campo elétrico na direção axial.	40
Figura 3-22: Modelo 1 - curvas de campo elétrico na direção radial.	41
Figura 3-23: Modelo 1 - distribuição de tensão exatamente antes da DP.	41
Figura 3-24: Modelo 1 - distribuição de tensão exatamente no final da DP.	41
Figura 3-25: Modelo 1 - curvas de tensão na direção axial.	42
Figura 3-26: Modelo 1 - distribuição de densidade de corrente antes da DP.	42
Figura 3-27: Modelo 1 - distribuição de densidade de corrente no início da DP.	43
Figura 3-28: Modelo 1 - curvas de densidade de corrente na direção axial.	43
Figura 3-29: Modelo 1 - curvas de densidade de corrente na direção radial.	43

Figura 3-30: Modelo 1 - campo elétrico no centro da cavidade (zoom).....	44
Figura 3-31: Modelo 1 - forma de onda de corrente na cavidade (zoom).	44
Figura 3-32: Modelo 1 - formas de onda de carga (zoom).	44
Figura 3-33: Modelo 2 - formas de onda de campo elétrico.....	45
Figura 3-34: Modelo 2 - forma de onda da corrente na cavidade.	45
Figura 3-35: Modelo 2 - forma de onda de carga das DPs.	46
Figura 3-36: Modelo 3 - formas de onda de campo elétrico e condutividade.	47
Figura 3-37: Modelo 3.1 - campo elétrico devido às cargas de superfície (zoom).....	47
Figura 3-38: Modelo 3.2 - formas de onda de campo elétrico e condutividade.	48
Figura 3-39: Modelo 3.3 - formas de onda de campo elétrico e condutividade.	48
Figura 3-40: Modelo 3.1 - forma de onda da corrente na cavidade.	49
Figura 3-41: Modelo 3.2 - forma de onda da corrente na cavidade.	49
Figura 3-42: Modelo 3.3 - forma de onda da corrente na cavidade.	49
Figura 3-43: Modelo 3.1 - forma de onda de carga das DPs.	49
Figura 3-44: Modelo 3.2 - forma de onda de carga das DPs.	50
Figura 3-45: Modelo 3.3 - forma de onda de carga das DPs.	50
Figura 3-46: Modelo 3 - formas de onda de campo elétrico.....	50
Figura 3-47: Modelo 3 - forma de onda de carga aparente das DPs.....	51
Figura 3-48: Modelo 3 - gráfico ϕ -q-n.	51
Figura 4-1: Esquema da bobina pré-formada de uma máquina [11].	53
Figura 4-2: Esquema 2D para simulação da bobina.	54
Figura 4-3: Esquema 3D da bobina modelada.	54
Figura 4-4: Campo elétrico na direção y.....	55
Figura 4-5: Bobina sem cavidade - malha e distribuições 3D.	56
Figura 4-6: Campo elétrico no centro do isolamento e tensão aplicada.	56
Figura 4-7: Plano xz que passa pelo centro da bobina.....	57
Figura 4-8: Bobina sem cavidade - distribuição de campo elétrico e tensão (2D).	57
Figura 4-9: Bobina sem cavidade - distribuição de campo elétrico e tensão (Zoom).....	57
Figura 4-10: Bobina sem cavidade - campo elétrico na direção x.	58
Figura 4-11: Bobina sem cavidade - tensão na direção x.	58
Figura 4-12: Esquema 2D para simulação da bobina..	59
Figura 4-13: Caso base - geometria e malha.....	60
Figura 4-14: Caso base - campo elétrico no centro do isolamento e tensão aplicada.....	60
Figura 4-15: Formas de onda de campo elétrico.....	61
Figura 4-16: Forma de onda da corrente na cavidade.....	61
Figura 4-17: Formas de onda de carga das DPs.....	61
Figura 4-18: Distribuição de campo elétrico - (a) antes da DP; (b) final da DP.....	62
Figura 4-19: Distribuição de campo elétrico antes e no final da DP (Zoom).	62
Figura 4-20: Curvas de campo elétrico na direção x.	63
Figura 4-21: Curvas de campo elétrico na direção z.....	63
Figura 4-22: Distribuição de tensão - (a) antes da DP; (b) final da DP.	64
Figura 4-23: Distribuição de tensão (Zoom) - (a) antes da DP; (b) final da DP.....	64
Figura 4-24: Curvas de tensão na direção x.....	65
Figura 4-25: Distribuição de densidade de corrente no início e antes da DP (Zoom).	65

Figura 4-26: Curvas de densidade de corrente na direção x.	65
Figura 4-27: Curvas de densidade de corrente na direção z.	66
Figura 4-28: Forma de onda de campo elétrico no centro da cavidade (zoom).	66
Figura 4-29: Forma de onda de corrente na cavidade (zoom).	67
Figura 4-30: Formas de onda de carga (zoom).	67
Figura 4-31: Caso base - formas de onda de campo elétrico.	67
Figura 4-32: Caso base - forma de onda de carga aparente das DPs.	68
Figura 4-33: Esquema da bobina para variação da espessura do isolamento.	69
Figura 4-34: Campo elétrico em função da espessura do isolamento.	69
Figura 4-35: Caso 1 - curvas de tensão na direção x.	70
Figura 4-36: Caso 1 - curvas de campo elétrico na direção x.	70
Figura 4-37: Caso 1 - curvas de campo elétrico na direção z.	70
Figura 4-38: Caso 1.1 - formas de onda de campo elétrico.	71
Figura 4-39: Caso 1.1 - forma de onda de carga aparente das DPs.	72
Figura 4-40: Caso 1.2 - formas de onda de campo elétrico.	72
Figura 4-41: Caso 1.2 - forma de onda de carga aparente das DPs.	72
Figura 4-42: Campo elétrico em função da amplitude da tensão aplicada.	73
Figura 4-43: Caso 2 - curvas de tensão na direção x.	74
Figura 4-44: Caso 2 - curvas de campo elétrico na direção x.	74
Figura 4-45: Caso 2 - curvas de campo elétrico na direção z.	74
Figura 4-46: Caso 2.1 - formas de onda de campo elétrico.	75
Figura 4-47: Caso 2.1 - forma de onda de carga aparente das DPs.	75
Figura 4-48: Caso 2.2 - formas de onda de campo elétrico.	76
Figura 4-49: Caso 2.2 - forma de onda de carga aparente das DPs.	76
Figura 4-50: Esquema da bobina para variação da posição da cavidade.	77
Figura 4-51: Campo elétrico em função da posição da cavidade.	77
Figura 4-52: Caso 3 - curvas de tensão na direção x.	78
Figura 4-53: Caso 3 - curvas de campo elétrico na direção x.	78
Figura 4-54: Caso 3 - curvas de campo elétrico na direção z.	78
Figura 4-55: Caso 3.1 - formas de onda de campo elétrico.	79
Figura 4-56: Caso 3.1 - forma de onda de carga aparente das DPs.	80
Figura 4-57: Caso 3.2 - formas de onda de campo elétrico.	80
Figura 4-58: Caso 3.2 - forma de onda de carga aparente das DPs.	80
Figura 4-59: Esquema da bobina para variação do raio da cavidade.	81
Figura 4-60: Campo elétrico em função do raio da cavidade.	81
Figura 4-61: Caso 4 - curvas de tensão na direção x.	82
Figura 4-62: Caso 4 - curvas de campo elétrico na direção x.	82
Figura 4-63: Caso 4 - curvas de campo elétrico na direção z.	82
Figura 4-64: Caso 4.1 - formas de onda de campo elétrico.	84
Figura 4-65: Caso 4.1 - forma de onda de carga aparente das DPs.	84
Figura 4-66: Caso 4.2 - formas de onda de campo elétrico.	84
Figura 4-67: Caso 4.2 - forma de onda de carga aparente das DPs.	84
Figura 4-68: Caso 5.1 - formas de onda de campo elétrico.	87
Figura 4-69: Caso 5.1 - forma de onda de carga aparente das DPs.	87

Figura 4-70: Caso 5.2 - formas de onda de campo elétrico.	88
Figura 4-71: Caso 5.2 - forma de onda de carga aparente das DPs.	88
Figura 4-72: Esquema de cavidade com geometria elipsoidal.....	90
Figura 4-73: Geometria com cavidade elipsoidal.	90
Figura 4-74: Campo elétrico no centro do isolamento.....	91
Figura 4-75: Distribuição de campo elétrico: (a) antes da DP; (b) fim da DP.....	92
Figura 4-76: Distribuição de campo elétrico (Zoom): (a) antes da DP; (b) fim da DP. .	92
Figura 4-77: Curvas de campo elétrico na direção x.	93
Figura 4-78: Curvas de campo elétrico na direção z.....	93
Figura 4-79: Distribuição de tensão: (a) antes da DP; (b) final da DP.	93
Figura 4-80: Distribuição de tensão (Zoom): (a) antes da DP; (b) final da DP.	94
Figura 4-81: Curvas de tensão na direção x.....	94
Figura 4-82: Distribuição de densidade de corrente - (a) antes; (b) início da DP.	94
Figura 4-83: Distribuição de densidade de corrente antes e no início da DP (Zoom). ...	95
Figura 4-84: Curvas de densidade de corrente na direção x.	95
Figura 4-85: Curvas de densidade de corrente na direção z.	95
Figura 4-86: Campo elétrico em função da espessura do isolamento.....	96
Figura 4-87: Campo elétrico em função do raio perpendicular ao campo aplicado.	96
Figura 4-88: Caso 6 - curvas de tensão na direção x.	97
Figura 4-89: Caso 6 - curvas de campo elétrico na direção x.....	97
Figura 4-90: Caso 6 - curvas de campo elétrico na direção z.....	97
Figura 4-91: Caso 6.1 - formas de onda de campo elétrico.	98
Figura 4-92: Caso 6.1 - forma de onda de carga aparente das DPs.	99
Figura 4-93: Caso 6.2 - formas de onda de campo elétrico.	99
Figura 4-94: Caso 6.2 - forma de onda de carga aparente das DPs.	99

Lista de Tabelas

Tabela 1-1: Causas de falha em motores elétricos da indústria petroquímica [1].	1
Tabela 1-2: Causas de falha origem elétrica em motores elétricos [2].	2
Tabela 1-3: Contribuinte para a falha de motores elétricos [2].	2
Tabela 3-1: Parâmetros constantes.	30
Tabela 3-2: Parâmetros variáveis.	31
Tabela 3-3: Modelo 3 - resultados gerais.	51
Tabela 4-1: Dados da bobina utilizada.	54
Tabela 4-2: Caso base - resultados gerais.	68
Tabela 4-3: Caso 1 - parâmetros de simulação.	71
Tabela 4-4: Caso 1 - resultados gerais.	72
Tabela 4-5: Caso 2 - parâmetros de simulação.	75
Tabela 4-6: Caso 2 - resultados gerais.	76
Tabela 4-7: Caso 3 - parâmetros de simulação.	79
Tabela 4-8: Caso 3 - resultados gerais.	80
Tabela 4-9: Caso 4 - parâmetros de simulação.	83
Tabela 4-10: Caso 4 - resultados gerais.	85
Tabela 4-11: Caso 5 - parâmetros de simulação.	86
Tabela 4-12: Caso 5 - resultados gerais.	88
Tabela 4-13: Caso 6 - parâmetros de simulação.	98
Tabela 4-14: Caso 6 - resultados gerais.	99

Lista de símbolos

a	raio da cavidade paralelo ao campo aplicado
b	raio da cavidade perpendicular ao campo aplicado
C_a	capacitância equivalente do dielétrico sem defeito
C_{a1} e C_{a2}	capacitâncias do dielétrico sem defeito
C_b	capacitância equivalente do dielétrico em série com a cavidade
C_{b1} e C_{b2}	capacitâncias do dielétrico em série com a cavidade
C_c	capacitância da cavidade
DP	Descarga Parcial
D	densidade de campo elétrico
D_{sinf}	densidade de campo elétrico do lado inferior da superfície superior da cavidade
D_{ssup}	densidade de campo elétrico do lado superior da superfície superior da cavidade
E	campo elétrico
E_0	campo elétrico devido à tensão aplicada
E_{cav}	campo elétrico no centro da cavidade
E_{DP}	campo elétrico de ocorrência da DP
E_{ext}	campo elétrico de extinção
E_{lp} , n e B	parâmetros de caracterização do processo de ionização
E_{rup}	campo elétrico de ruptura
E_s	campo elétrico devido às cargas de superfície
$E_{sqpresa}$	campo elétrico devido às cargas de superfície presas
$E_{sqlivre}$	campo elétrico devido às cargas de superfície livres
E_{sup}	campo elétrico na superfície da cavidade
f	frequência da tensão aplicada
f_c	fator de intensificação do campo elétrico na cavidade
$f_c E_0$	campo elétrico na cavidade sem ocorrência de descarga
h_{iso}	altura do isolante
h_{sup}	espessura da superfície da cavidade
I_{cav}	corrente na cavidade

I_{ele}	corrente na superfície aterrada da geometria
J_{ap}	densidade de corrente na superfície aterrada da geometria
J_{cav}	densidade de corrente na seção transversal da cavidade
N_{DP}	taxa de elétrons gerada pela última descarga
N_{es}	taxa de geração elétrons devido à emissão de superfície
N_{es0}	taxa de geração elétrons inicial devido à emissão de superfície
N_{es0A}	taxa de geração de elétrons inicial alta devido à emissão de superfície
N_{es0B}	taxa de geração de elétrons inicial baixa devido à emissão de superfície
N_{ev}	taxa de emissão de elétrons devido ao volume da cavidade
N_g	taxa de geração de elétrons total
P	probabilidade de ocorrência da descarga
P_{cav}	pressão na cavidade
q_{DPre}	carga real da descarga
q_{DPap}	carga aparente da descarga
$q_{DPtotal}$	carga real total de todas as descargas parciais
q_{slivre}	cargas livres na superfície da cavidade
R	número gerado aleatoriamente
$raio$	raio da cavidade
r_{iso}	raio do isolante
S_{cav}	seção transversal da cavidade
S_{ele}	área da superfície aterrada da geometria
T_{amb}	temperatura ambiente
T_{cav}	temperatura no centro da cavidade
t_{DP}	instante de ocorrência da descarga parcial
T_{mat}	temperatura da geometria
T_{sup}	temperatura na superfície da cavidade
V	potencial elétrico
V_{amp}	amplitude da tensão aplicada
V_{ampn}	amplitude da tensão aplicada para o caso base
V_{ext}	tensão de extinção da descarga parcial
V_{rup}	tensão de ruptura
Δt	passo de integração
Δt_{comDP}	passo de integração no período com descarga

Δt_{semDP}	passo de integração no período sem descarga
x_n	posição do centro da cavidade na direção x para o caso base
α	coeficiente de <i>stress</i>
β	coeficiente térmico
ε	permissividade do material dielétrico
ε_{riso}	permissividade relativa do material dielétrico
ε_{rcav}	permissividade relativa da cavidade
ε_{rsup}	permissividade relativa da superfície da cavidade
ρ_v	densidade de carga elétrica
σ	condutividade do material
σ_{cav}	condutividade da cavidade
σ_{cav0}	condutividade da cavidade sem descarga
σ_{cavmax}	condutividade da cavidade com descarga
σ_{iso}	condutividade do material isolante
σ_{sup}	condutividade da superfície da cavidade
σ_{sup0}	condutividade inicial da superfície da cavidade
σ_{supmax}	condutividade máxima da superfície da cavidade
τ_{dec}	constante de tempo de decaimento da carga efetiva de superfície

Capítulo 1

1 INTRODUÇÃO

A continuidade operacional dos equipamentos elétricos é de fundamental importância em unidades industriais, tendo em vista que falhas inesperadas podem comprometer a operação levando a grandes prejuízos. Em se tratando de máquinas elétricas, técnicas preditivas são utilizadas para antever possíveis problemas antes que o isolamento falhe. Uma maneira de acompanhar a condição da deterioração do isolamento de máquinas elétricas de média tensão, seja gerador ou motor, é a medição das descargas parciais ao longo do período de operação. Descarga Parcial (DP) é um pequeno arco elétrico que ocorre no isolamento devido a um defeito em seu interior. Na verdade, a descarga é dita parcial, pois não se trata propriamente de um curto fase-terra e/ou fase-fase e sim um defeito que rompe parcialmente o isolamento. Neste sentido, nesse capítulo tem-se por objetivo apresentar as motivações para se estudar esse assunto de Descargas Parciais em máquinas elétricas e enumerar os objetivos principais deste trabalho.

1.1 Motivação

Existem diversas causas, de origem elétrica e de origem mecânica, que podem levar as máquinas elétricas a falha. Em [1] são apresentadas as causas de falha em motores elétricos na indústria petroquímica, conforme apresentado na Tabela 1-1.

Tabela 1-1: Causas de falha em motores elétricos da indústria petroquímica [1].

Componente	Falha [%]
Mancais	51,6
Enrolamento do Estator	24,8
Rotor (barras/anéis)	6
Eixo ou acoplamento	3,2
Dispositivo Externo	13,6
Outros	0,8

Com base na Tabela 1-1 percebe-se que uma grande parcela de causa de falhas está relacionada ao estator da máquina, totalizando 24,8%. Em outro trabalho [2] são também apresentadas as causas de falhas de motores elétricos em indústrias de modo geral. Na Tabela 1-2 são mostrados os resultados com enfoque nas causas de origem elétrica.

Tabela 1-2: Causas de falha origem elétrica em motores elétricos [2].

Componente	Falha [%]
Isolamento principal do estator	23,0
Isolamento entre espiras	4,0
Núcleo	3,0
Amarrações	1,0
Gaiola	5,0
Total	36,0

Conforme apresentado Tabela 1-2 percebe-se uma porcentagem de falha de 23% no enrolamento do estator. Ainda, neste mesmo trabalho [2] é apresentado o contribuinte para a falha, o qual pode ser visto na Tabela 1-3, o que mostra uma parcela significativa de falhas devido à deterioração normal.

Tabela 1-3: Contribuinte para a falha de motores elétricos [2].

Componente	Falha [%]
Sobrecarga	51,6
Deterioração normal	24,8

Logo, a partir das tabelas anteriores nota-se que o isolamento da máquina é um dos componentes com alta porcentagem de falha e, além disso, a deterioração normal do isolamento também é um grande contribuinte para falhas em motores elétricos. Tendo em vista a relevância da porcentagem de falhas de máquinas elétricas por meio da deterioração do isolamento do estator, o estudo de descargas parciais é um assunto importante e que merece atenção.

A monitoração de descargas parciais permite acompanhar a condição do isolamento da máquina e em função da tendência no nível de descargas parciais é possível prever se o isolamento da máquina está próximo a falhar. Por meio dessa predição é possível realizar uma manutenção programada antes que a máquina falhe e evitar, assim, prejuízos maiores devido a uma eventual falha inesperada. Em [3] é apresentada uma curva de tendência da evolução do nível de descargas parciais ao longo da vida útil do enrolamento do estator de uma máquina elétrica, conforme pode ser visto na Figura 1-1.

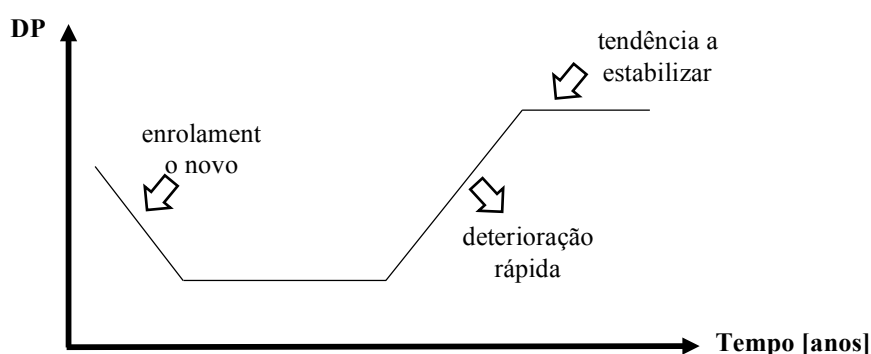


Figura 1-1: Tendência do nível de descargas parciais no estator [3].

Conforme pode ser visto no início da operação da máquina há um maior nível de descargas parciais, que ocorre devido ao fato que o isolamento ainda não foi totalmente curado. Após o decaimento inicial, há uma estabilização e, posteriormente, ocorre um aumento no nível de descargas parciais levando a uma deterioração rápida do isolamento. Em seguida, ocorre estabilização e o isolamento pode falhar a qualquer momento. Ainda nessa mesma figura é possível perceber a importância do monitoramento do nível de descargas parciais desde o início da operação da máquina para que seja possível conhecer o estágio da deterioração do isolamento, pois, por exemplo, caso houvesse monitoramento somente após algum tempo de operação, as regiões antes e depois da deterioração rápida poderiam ser confundidas, uma vez que nas duas regiões o nível de descargas parciais é praticamente constante, e haveria, portanto, a impressão que o isolamento não estaria deteriorado [3].

1.2 Objetivos

Existem modelos que descrevem os princípios das descargas parciais, sendo um destes modelos obtido com o uso de elementos finitos, o qual é utilizado nesta dissertação. Neste sentido, o objetivo principal deste trabalho é utilizar o método de elementos finitos para estudar descargas parciais em uma bobina do estator de uma máquina elétrica analisando a influência de alguns parâmetros.

Logo, objetiva-se por meio do modelo via elementos finitos, estudar o fenômeno de descargas parciais em uma bobina do estator de uma máquina elétrica de 13,8 kV de tensão nominal com uma cavidade no interior de sua isolação principal. A fim de verificar os parâmetros que afetam o comportamento das descargas parciais no isolamento de máquinas elétricas são estudados diversos casos, alterando-se:

- ✓ a espessura da isolação principal;
- ✓ a amplitude da tensão aplicada;
- ✓ a posição da cavidade;
- ✓ o raio da cavidade;
- ✓ a temperatura da geometria;
- ✓ a geometria da cavidade.

1.3 Metodologia

Esta dissertação está dividida em cinco capítulos, sendo que, no primeiro e presente capítulo, o tema, as motivações e os objetivos principais são apresentados.

No capítulo 2 é feita uma revisão bibliográfica do tema, onde são apresentados conceitos gerais relacionados ao tema de descargas parciais e, além disso, alguns modelos existentes para a modelagem de descargas parciais são descritos. Por fim, é feita uma

breve introdução à medição de descargas parciais, uma vez que um dos métodos de apresentação dos resultados de descargas parciais, comumente utilizado na prática, é usado nesse trabalho.

Em sequência, no capítulo 3, o modelo via elementos finitos utilizado é descrito em detalhes, e com o intuito de validá-lo, são feitas simulações em uma geometria com simetria cilíndrica. O modelo utilizado foi apresentado por Illias na Universidade de Southampton em 2011 [4] e trata-se de um modelo dinâmico que usa um código Matlab que interage com o *software* de elementos finitos Comsol.

No capítulo 4, o modelo apresentado no capítulo 3 é aplicado a uma bobina estatórica de uma máquina elétrica de 13,8 kV de tensão nominal com uma cavidade em sua isolamento principal. A fim de entender melhor o fenômeno em máquinas elétricas, é verificada a influência de alguns parâmetros por meio de várias simulações alterando-se, o raio, a posição e a geometria da cavidade, a amplitude da tensão aplicada, a espessura da isolamento principal e, finalmente, a temperatura inicial da geometria.

No capítulo 5 são apresentadas as conclusões e são sugeridos possíveis trabalhos futuros.

Capítulo 2

2 REVISÃO DA LITERATURA

Descarga Parcial (DP) é um fenômeno que ocorre no isolamento de equipamentos elétricos devido à presença de imperfeições (cavidades ou espaços vazios) no isolamento. A descarga ocorre quando a imperfeição é submetida a um *stress* elétrico que excede sua rigidez dielétrica ocasionando um pulso de corrente de alta frequência [5]. A descarga é dita como parcial pois não há um curto-circuito fase-terra (ou fase-fase), mas sim um pequeno arco que rompe parcialmente o isolamento [5]. A Figura 2-1 mostra um esquema de um isolante com uma cavidade de ar submetido a uma fonte de tensão alternada.

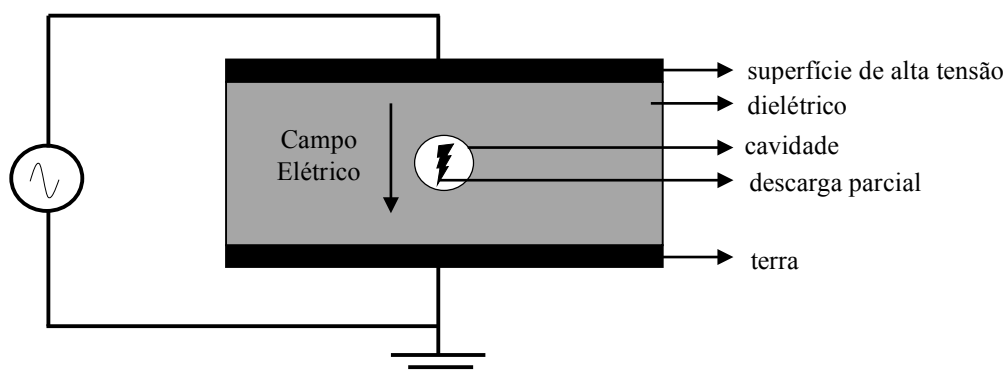


Figura 2-1: Esquema de um isolante com uma cavidade [4].

Para o esquema mostrado na Figura 2-1, quando se aplica uma tensão no isolante percebe-se que o campo elétrico na cavidade é maior que nas outras regiões do isolante, visto que a permissividade relativa do ar é menor que a do isolante. Se o campo elétrico na cavidade for superior ao campo de ruptura, irá ocorrer um curto-circuito interno ao isolante, caracterizando uma descarga parcial na cavidade [4].

Para máquinas elétricas acima de 1000 V são usualmente usadas bobinas pré-formadas (*form-wound coils*), as quais são montadas antes da inserção nas ranhuras do estator [3]. Na montagem das bobinas são usualmente adicionados materiais isolantes nas diferentes partes, formando assim o isolamento da máquina, tal como mostrado na Figura 2-2.

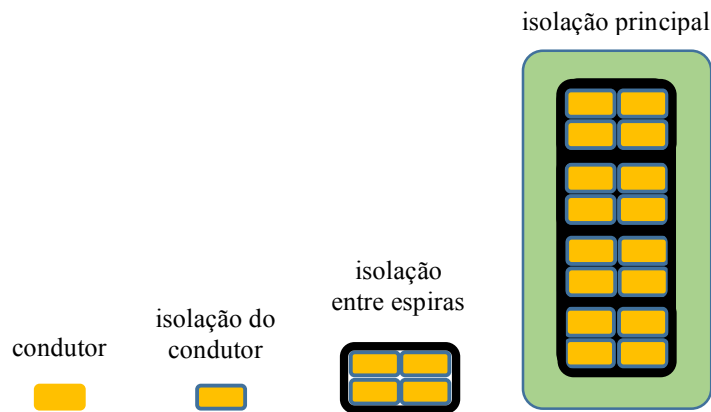


Figura 2-2: Seção transversal de uma bobina pré-formada.

A função básica de cada parte do isolamento é a seguinte [3]:

- ✓ isolação do condutor: reduzir o efeito pelicular (*skin depth*);
- ✓ isolação entre espiras: evitar curto-circuito entre as espiras;
- ✓ isolação principal (*main wall* ou *groundwall insulation*): isolar o condutor energizado do núcleo do estator aterrado.

Posteriormente, são adicionadas duas camadas nas bobinas, sendo a camada semicondutiva e a camada de *stress grading* (ou camada de alívio de campo). A camada semicondutiva tem por objetivo assegurar que haja um valor reduzido de tensão entre o condutor e o núcleo do estator [6]. Já a camada de alívio de campo visa uniformizar o campo elétrico no ponto de saída das bobinas das ranhuras. Um esquema das camadas pode ser visto na Figura 2-3.

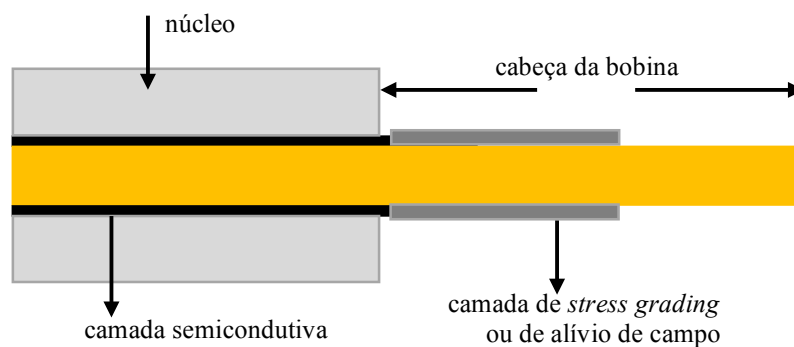


Figura 2-3: Esquema de camadas em uma bobina pré-formada [7].

Em máquinas elétricas com bobinas pré-formadas com tensão acima de 4 kV, descargas parciais podem ocorrer dentro da isolação principal ou entre a superfície da bobina e o núcleo do estator, o qual encontra-se aterrado [3]. Se houver um vazio ou cavidade de ar interna ao isolamento, o alto valor de campo elétrico pode levar a ocorrência de descargas parciais, as quais irão degradar o isolamento principal da máquina e, caso não houver correções, a repetição destas descargas poderá aumentar o tamanho da cavidade levando a falha do isolamento [3].

A norma IEC 60034-27 [8] divide as descargas parciais em quatro grupos em função de sua origem, podendo ser descargas internas ao isolamento, descargas de superfície nas cabeças de bobina, descargas de ranhura e descargas devido a partículas condutivas.

As descargas internas ocorrem devido a cavidades internas inerentes do processo de fabricação ou a delaminações em função de cura imperfeita ou estresse térmico [8].

Descargas de superfície nas cabeças de bobina ocorrem devido ao alto valor de campo elétrico em determinados locais, ocorrendo quando há algum defeito na camada de alívio de campo como, por exemplo, fabricação, contaminação, porosidade, efeitos térmicos, etc [8].

As descargas de ranhura ocorrem entre a bobina e o núcleo do estator podendo ocorrer devido a bobinas frouxas, defeito no processo de fabricação da camada semicondutiva ou um contato inadequado da camada semicondutiva e o núcleo da máquina [9].

Existem também as descargas devido à contaminação por partículas condutivas, especialmente partículas pequenas, que resultam em uma concentração local de descargas parciais [8].

Conforme dito anteriormente, a medição de descargas parciais permite acompanhar a condição do isolamento de máquinas, uma vez que tal medição pode indicar a existência de vários defeitos no isolamento, dos quais podem-se citar [3][10]:

- ✓ falha na impregnação que geram cavidades internas ao isolamento;
- ✓ aquecimento que ocasiona deterioração térmica, podendo gerar delaminações;
- ✓ deterioração das camadas semicondutiva e de alívio de campo, podendo gerar descargas de ranhura ou nas cabeças de bobina;
- ✓ problemas de ciclos de carga que criam cavidades próximas aos condutores;
- ✓ espaço insuficiente entre as bobinas nas cabeças de bobina, podendo criar descargas de superfície;
- ✓ bobinas frouxas na ranhura levando à ocorrência descargas de ranhura.

A Figura 2-4 mostra um esquema de alguns destes problemas em uma seção transversal de uma bobina.

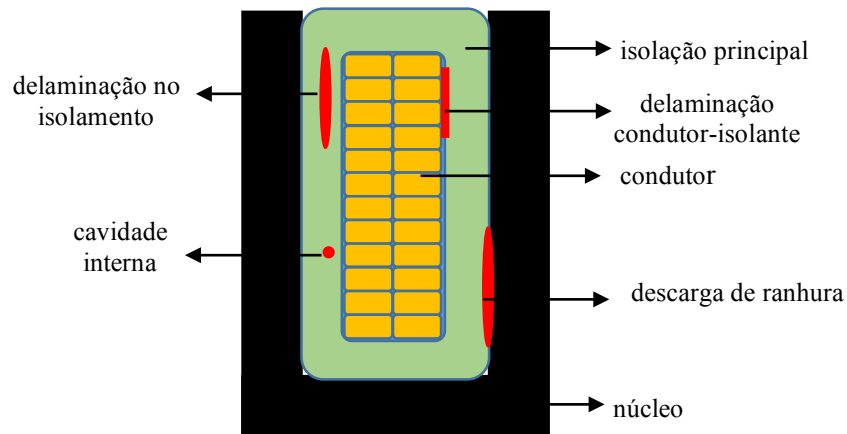


Figura 2-4: Problemas em uma seção transversal de uma bobina pré-formada [11].

Vale ressaltar que, apesar de ser possível detectar os problemas anteriormente enumerados por meio da medição de descargas parciais, neste trabalho são estudadas as descargas parciais devido a cavidades internas e devido à delaminação no isolamento, sendo esta última, nesta dissertação, aproximada por uma cavidade elipsoidal. Existem na literatura algumas modelagens que descrevem o comportamento das descargas parciais que são aplicáveis a cavidades e, desta forma, nos próximos itens é apresentada a evolução dos modelos, sendo o primeiro modelo o abc capacitivo, que modela a cavidade e o dielétrico como capacitâncias, em seguida um modelo analítico generalizado mais detalhado e, finalmente, um modelo que utiliza elementos finitos.

2.1 Modelo abc Capacitivo

Este é um modelo simples, o qual consiste do uso de capacitâncias que representam o isolamento e a cavidade [12]. A fim de melhor entender o modelo, seja o esquema de um material dielétrico com uma cavidade em seu interior, representados por meio de capacitâncias, tal como mostrado na Figura 2-5.

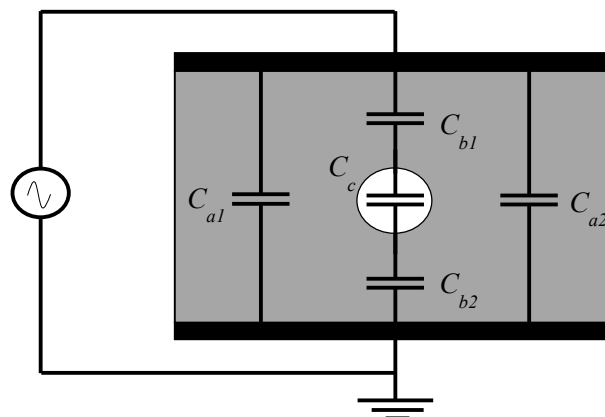


Figura 2-5: Modelo abc capacitivo [4].

De acordo com a Figura 2-5, as capacitâncias C_{a1} e C_{a2} representam a porção do dielétrico sem cavidade, C_c representa a capacitância da cavidade e C_{b1} e C_{b2} indicam as

capacitâncias do dielétrico em série com o defeito. O circuito da Figura 2-5 pode ser reduzido a um circuito equivalente conforme mostrado pela Figura 2-6.

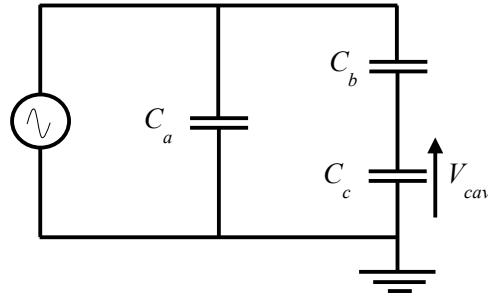


Figura 2-6: Circuito equivalente do modelo abc capacitivo [4].

De acordo com o modelo, a descarga parcial irá ocorrer sempre que a tensão sobre a cavidade, representada por C_c , for maior que a tensão de ruptura (V_{rup}). Depois de iniciado, o processo de descarga termina quando a tensão sobre a cavidade for menor que a tensão de extinção (V_{ext}). Quando ocorre a descarga a capacitância C_c é curto-circuitada e no transitório ocorre um pulso de corrente representando a corrente de descarga [4].

O modelo foi utilizado em vários trabalhos, como por exemplo em [13] [14] [15] [16] [17], no entanto, em uma cavidade real há acúmulo de carga na superfície da cavidade após a ocorrência de uma descarga parcial e a superfície da cavidade não é uma superfície equipotencial [18] [19] [20].

2.2 Modelo Geral para Descargas Parciais

Em [21] é apresentado um modelo geral para descrever o fenômeno de descargas parciais. Trata-se de um modelo analítico detalhado para descargas parciais do tipo *streamer* que apresenta equações para: a geração inicial de elétrons (devido ao volume da cavidade e devido à emissão de superfície), as cargas devido à descarga parcial (física e induzida ou real e aparente) e o decaimento da carga de superfície.

No modelo, é descrito que a descarga parcial é causada por um aumento do campo elétrico na cavidade que é, em geral, provocado pela contribuição do campo devido à tensão aplicada e pelo acúmulo de cargas na superfície da cavidade em função de descargas parciais anteriores. O campo elétrico é obtido pela solução da equação de Laplace e o aumento do campo na cavidade é rateado para se obter o fator de intensificação do campo elétrico. Este fator é usado para estimar o campo elétrico devido à tensão aplicada e o campo elétrico devido às cargas de superfície na cavidade. O modelo foi utilizado em outros trabalhos, como por exemplo em [22] [23] [24].

2.3 Modelo utilizando Elementos Finitos

Nos modelos apresentados anteriormente são utilizadas diferentes formas de modelagem para o fenômeno de descargas parciais. A escolha do método de cálculo do campo elétrico na cavidade divide as modelagens em diferentes grupos [25] e, tal como mostrado anteriormente, caracterizam-se pelo uso de capacitâncias ou pela equação de Laplace. No entanto, existem trabalhos que utilizam o método dos elementos finitos para a obtenção do campo elétrico na cavidade. Em [25] o modelo via elementos finitos é utilizado para estudar a dependência de descargas parciais com a frequência da tensão aplicada em uma geometria com uma cavidade cilíndrica. Os resultados são comparados com ensaios práticos para validação do modelo. Existem outros trabalhos que utilizam e/ou explicam este modelo via elementos finitos, como por exemplo os encontrados em [26] [27] [28].

No trabalho [4], o qual é utilizado como referência nesta dissertação, é apresentada uma modelagem detalhada em um isolante cilíndrico com uma cavidade esférica. São feitas inúmeras simulações, alterando-se o tamanho e posição da cavidade, frequência e amplitude da tensão aplicada e a temperatura inicial do material isolante. Para a validação do modelo foram feitas comparações com medições práticas. O modelo considera, o caráter estatístico da descarga parcial, a taxa de geração de elétrons, o decaimento de cargas de superfície e a elevação da temperatura provocada pela descarga.

Em ambos os trabalhos que utilizam elementos Finitos a descarga parcial é modelada dinamicamente, de tal forma que quando confirmado o processo de descarga parcial a condutividade da cavidade é alterada de zero para um determinado valor, indicando que a cavidade passou a ser um condutor dentro do isolante. Os modelos contam com um código que envia as condições de fronteira para o *software* de elementos finitos, o qual obtém as distribuições de campo elétrico na geometria. É importante ressaltar que em ambos os modelos foi utilizada uma simetria 2D para a modelagem da geometria, no entanto, nesta dissertação deseja-se estender o modelo para aplicação em uma bobina de uma máquina elétrica, logo é necessário o uso da geometria 3D para uma correta modelagem, o que acarreta em aumento significativo no tempo de simulação.

Uma vez que nesta dissertação é utilizado o modelo apresentado por Illias na Universidade de Southampton em 2011 [4], no Capítulo 3 é feita uma descrição em detalhes da modelagem utilizada, bem como são feitas simulações para implementação da modelagem.

2.4 Apresentação dos Resultados de uma DP

Quando ocorre a descarga parcial no isolamento de uma máquina elétrica há a geração de um pulso de corrente de alta frequência [5] que se propaga pelo enrolamento da máquina [10]. Desta forma, para que seja possível medir a descarga parcial é necessário dispor de um sensor que seja capaz de captar esse sinal de alta frequência e que o sistema de medição saiba diferenciar o que é ruído do que é de fato o sinal gerado pela descarga parcial [10]. Em máquinas elétricas, existem diferentes tipos de sensores que podem ser utilizados na prática para a medição de descargas parciais, dos quais podem-se citar, por exemplo, antenas, capacitores de alta tensão e transformadores de corrente de alta frequência [10]. Os sensores mais populares em máquinas elétricas para o monitoramento *online*, isto é, com a máquina em operação, são capacitores instalados no terminal de cada fase do estator [10], conforme mostrado pela Figura 2-7.

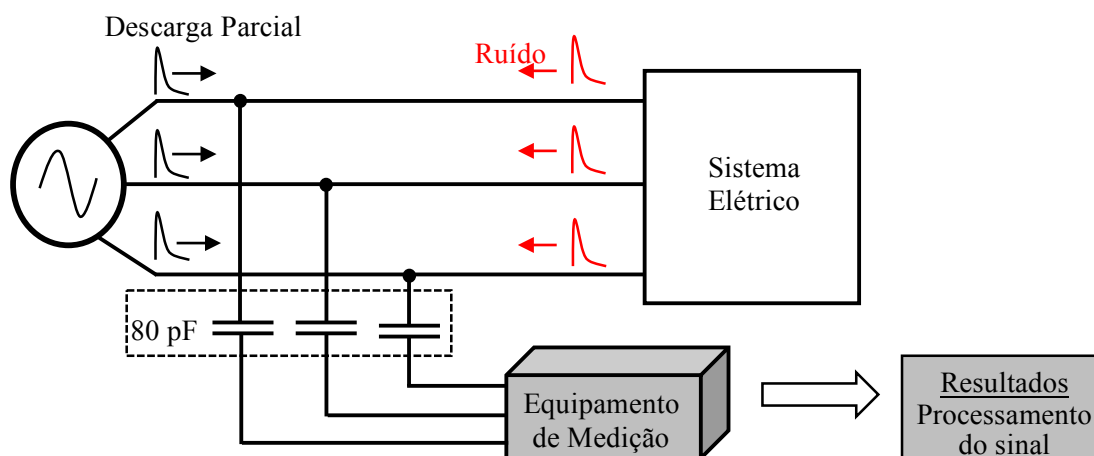


Figura 2-7: Exemplo de esquema de medição de descargas parciais.

Conforme pode ser visto na Figura 2-7, o sensor além de medir o pulso de corrente gerado pela descarga parcial, deve ser capaz de não incluir a componente de 60 Hz relativa à frequência da tensão de alimentação da máquina. Desta forma, podem ser utilizados capacitores de 80 pF [3], os quais representam uma baixa impedância para o sinal de alta frequência proveniente da descarga parcial e uma alta impedância para o sinal de 60 Hz.

Após a medição do pulso da descarga parcial, o sinal deve ser tratado para que seja possível exibir resultados e interpretá-los e, então, concluir-se acerca da condição do isolamento. Uma das formas de apresentação dos resultados da medição da descarga parcial é por meio dos *Phase Resolved Plots* (PRP). São representações por meio de gráficos que indicam a taxa de repetição para cada amplitude do pulso (ou descarga) e fase (ângulo) da tensão aplicada de ocorrência da descarga. Um dos tipos de PRP é o *Pulse Phase Analysis* (PPA), em que a taxa de repetição da descarga é representada por diferentes cores no gráfico, sendo também conhecido como gráfico φ - q - n . A Figura 2-8 apresenta um exemplo de um gráfico do tipo PRPPPA que é possível de obter por meio do modelo via elementos finitos utilizado.

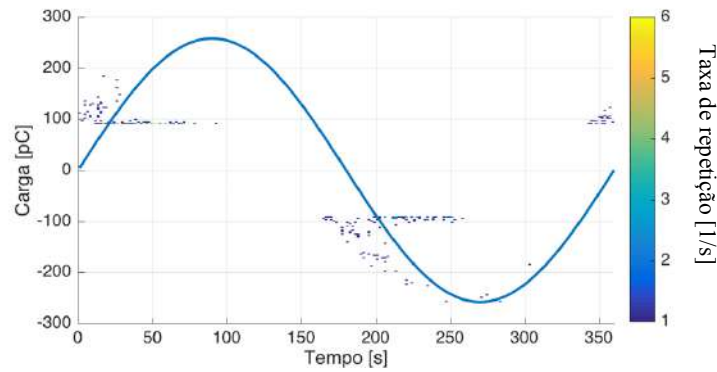


Figura 2-8: Exemplo de gráfico PRPPA.

Para se obter o PRPPA, após a medição do pulso da descarga deve-se fazer um tratamento estatístico do sinal, que está simploriamente apresentado na Figura 2-9.

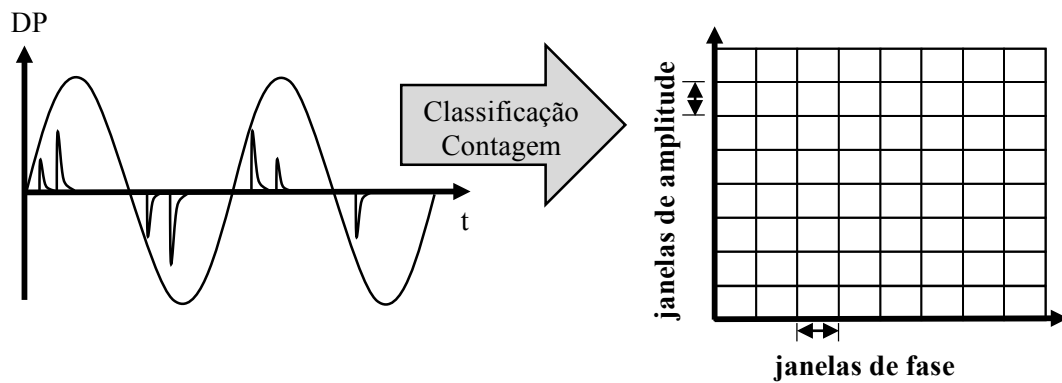


Figura 2-9: Esquema para obtenção do gráfico PRPPA [25].

O sinal proveniente do sensor pode ser um sinal de corrente, carga ou tensão [3], que apresenta uma amplitude e um determinado instante em que ocorreu, ou seja, a fase da tensão de alimentação no momento da DP. Para obtenção do PRPPA a amplitude e a fase são divididas em janelas e, então, cada pulso de descarga parcial é classificado de acordo com sua amplitude e fase e, portanto, inserido em sua “caixa” correspondente. Assim, de posse das amplitudes e fases dos sinais de DP em um determinado intervalo de tempo, obtém-se a taxa de repetição da descarga parcial para cada “caixa” e plota-se o PRPPA. Vale ressaltar ainda, que no gráfico PRPPA é apresentada a curva de uma senóide, que representa a tensão fase-neutro aplicada, com o objetivo de evidenciar a fase de ocorrência das descargas.

Existem outros métodos de apresentação de descargas parciais, no entanto não são aqui apresentados, pois neste trabalho é utilizado o gráfico PRPPA. No *script* usado nessa dissertação é possível obter o PRPPA, tal como é feito para geometria cilíndrica, no entanto, para a bobina, devido aos tempos impraticáveis de simulação o PRPPA não é obtido, ou seja, nos casos da bobina são simulados 10 ciclos da tensão aplicada, o que não é suficiente para se obter o PRPPA.

Capítulo 3

3 DESCRIÇÃO DO MODELO UTILIZADO

Conforme apresentado anteriormente é utilizado neste trabalho um modelo de estudo de descargas parciais que utiliza o método de elementos finitos para a obtenção da distribuição de campo elétrico na geometria da bobina. O modelo foi apresentado por Illias na Universidade de Southampton em 2011 [4] e considera várias características das descargas parciais conforme discutido adiante. Trata-se de um modelo dinâmico no qual um código envia as condições de fronteira a cada passo de integração para o *software* de elementos finitos que obtém as distribuições de campo elétrico, densidade de corrente e temperatura da geometria.

Existem outros trabalhos apresentados por Illias sobre vários estudos acerca de descargas parciais em cavidades [29]-[43].

3.1 Descarga *Streamer*

O modelo é usado para descargas do tipo *streamer*, pois os sinais de DP produzidos por este tipo de descarga são grandes o suficiente para serem detectados por equipamentos de medição, tendo duração da ordem de 1 a 100 ns e ordem de magnitude maior que 10 pC [21]. *Streamer* é um canal ionizado com ramos de avalanches, que consistem em elétrons em movimento sob a influência de um campo elétrico aplicado [4]. Durante estas avalanches, a temperatura da cavidade aumenta devido à energia liberada pela ionização e, conseqüentemente, há aumento da pressão da cavidade. A condutividade do *streamer* também aumenta devido ao movimento de elétrons livres, logo, a corrente no canal aumenta e como resultado tem-se um aumento da condutividade da cavidade [4]. O processo de descarga parcial pode ser entendido por meio do esquema apresentado na Figura 3-1.

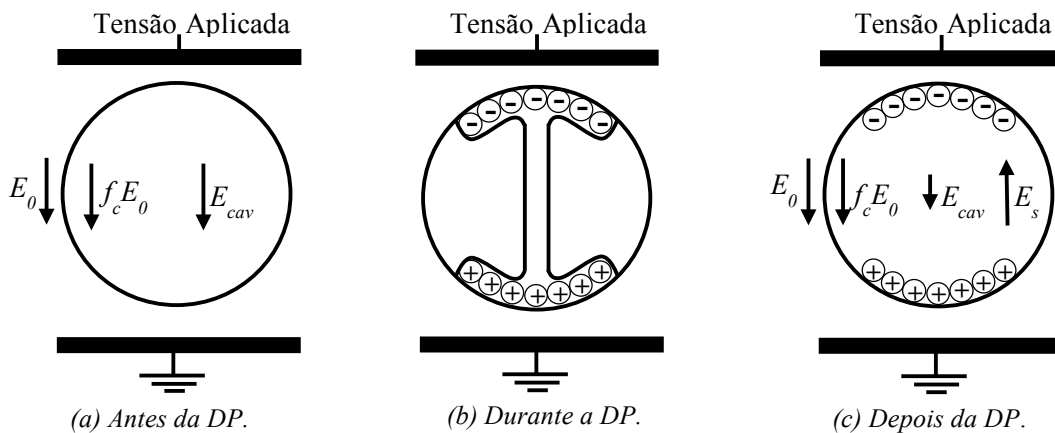


Figura 3-1: Esquema de ocorrência de uma DP [4].

Considerando a Figura 3-1(a), quando aplica-se tensão em um material isolante com uma cavidade, aparece um campo elétrico E_0 no material isolante e um campo elétrico E_{cav} na cavidade que, na ausência de descarga parcial, é igual a $f_c E_0$, conhecido como Campo Laplaciano, onde f_c é o fator de intensificação do campo elétrico que depende da geometria e da permissividade relativa do material isolante [4].

Quando ocorre a descarga parcial, cargas opostas atingem as extremidades da superfície da cavidade, tal como mostrado pela Figura 3-1(b), o que origina um campo elétrico oposto a $f_c E_0$ denotado por E_s e sendo, portanto, o campo elétrico devido ao acúmulo de cargas na superfície da cavidade, conhecido por Campo de Poisson [4]. O campo elétrico na cavidade é, portanto, definido pela Equação (3-1) [4].

$$E_{cav} = f_c E_0 + E_s \quad (3-1)$$

Durante a DP a cavidade se torna condutora e, portanto, o campo elétrico na cavidade é reduzido e uma vez que a descarga acontece muito rapidamente, o campo na cavidade cai bruscamente em uma curta duração [21]. A redução do campo elétrico na cavidade leva os elétrons livres a perderem energia e, conseqüentemente, a corrente e condutividade do *streamer* diminuem. Quando o campo elétrico na cavidade reduz a um valor inferior ao campo elétrico de extinção (E_{ext}) o processo de descarga termina [4].

Após o término da DP o campo elétrico na cavidade (E_{cav}) é menor, e o campo elétrico devido às cargas de superfície (E_s) aumenta, com relação ao instante anterior ao processo da descarga, conforme pode ser visto na Figura 3-1(c).

3.2 Campo Elétrico de Ruptura

Existem duas condições básicas que devem ser satisfeitas para que haja início do processo de descarga. A primeira é que o campo elétrico na cavidade deve ser superior ao campo elétrico de ruptura (E_{rup}) ou *Inception Field*, e a segunda é que hajam elétrons livres suficientes para o início da descarga [4]. O campo elétrico de ruptura para descargas do tipo *streamer* pode ser calculado pela Equação (3-2) [19]

$$E_{rup} = E_{lp} \cdot P_{cav} \left(1 + \frac{B}{(P_{cav} \cdot 2 \cdot a)^n} \right) \quad (3-2)$$

sendo que os parâmetros E_{lp} , B e n caracterizam o processo de ionização e, para o ar, $E_{lp} = 24,2$ [VPa⁻¹m⁻¹], $B = 8,6$ [m^{1/2}Pa^{1/2}] e $n = 0,5$ [19]. Além disso, P_{cav} é a pressão do ar na cavidade e a é o raio da cavidade na direção do campo elétrico aplicado. A pressão inicial do ar na cavidade é determinada pela Equação (3-2) de acordo com o campo elétrico de ruptura inicial considerado [44].

3.3 Taxa de Geração de Elétrons

A segunda condição para que haja descarga parcial é a existência de elétrons livres suficientes para o início do processo [4]. Logo, se o campo elétrico na cavidade for maior que o campo de ruptura não implica que necessariamente haverá a descarga parcial, pois para que haja a confirmação do processo de DP devem também haver elétrons livres suficientes para o início do processo. O fornecimento destes elétrons livres iniciais controla a característica estatística da DP, influenciando no atraso e frequência de ocorrência da descarga e distribuição com relação à fase da tensão aplicada (PRPPPA) [21].

As principais fontes de elétrons livres para o início da descarga podem ser divididas em dois grupos, emissão de superfície e ionização devido ao volume da cavidade [21]. Matematicamente, a taxa de geração de elétrons pode ser calculada por [4]:

$$N_g(t) = N_{es}(t) + N_{ev} \quad (3-3)$$

Sendo: $N_g(t)$ a taxa de geração de elétrons total [1/s];

$N_{es}(t)$ a taxa de geração de elétrons devido à emissão de superfície [1/s];

N_{ev} a taxa de emissão de elétrons devido ao volume da cavidade [1/s].

Conforme será visto adiante, no modelo considerado, a taxa de emissão de elétrons devido ao volume da cavidade é considerado constante durante a simulação.

3.3.1 Emissão de Superfície

A emissão de superfície é um processo de geração de elétrons em que os elétrons livres são emitidos a partir da superfície da cavidade sobre a influência do campo elétrico e da temperatura. As fontes de emissão de superfície são: desprendimento de elétrons presos na cavidade da superfície (ou próximos), injeção de elétrons pelo condutor em que é aplicada a tensão, elétrons livres que ainda permanecem na superfície da cavidade devido a descargas anteriores e elétrons liberados devido ao impacto do processo de ionização [4].

No modelo considerado é assumido que a principal fonte de emissão de superfície é devido ao desprendimento de elétrons da superfície da cavidade, os quais são oriundos de cargas que foram presas na superfície da cavidade em descargas parciais anteriores. Desta forma, a quantidade de carga que pode ser desprendida para a possibilidade de ocorrer uma descarga parcial é dependente da magnitude da carga da descarga anterior. Logo, antes da ocorrência da primeira descarga, a taxa de geração de elétrons totais depende somente da emissão pela ionização devido ao volume da cavidade e somente haverá elétrons livres devido à emissão de superfície após a ocorrência da primeira DP.

Matematicamente, o número de elétrons gerados por segundo devido à última descarga parcial (N_{DP}), pode ser calculado pela Equação (3-4):

$$N_{DP} = N_{es0} \left| \frac{E_{cav}(t_{DP})}{E_{rup0}} \right| \quad (3-4)$$

Sendo $E_{cav}(t_{DP})$ o campo elétrico na cavidade no momento de ocorrência da última DP [V/m] e N_{es0} o número de elétrons gerados por segundo para o campo elétrico de ruptura inicial (E_{rup0}) [1/s].

A taxa de geração de elétrons para o campo elétrico de ruptura (N_{es0}) é dependente da polaridade do campo elétrico na cavidade, uma vez que é mais difícil desprender elétrons quando a superfície da cavidade possui cargas negativas do que quando possui cargas positivas [44]. Logo, de acordo com [4]:

$$N_{es0} = \begin{cases} N_{es0B} & \text{se } \frac{E_{DP}[i]}{E_{DP}[i-1]} < 0 \\ N_{es0A} & \text{se } \frac{E_{DP}[i]}{E_{DP}[i-1]} > 0 \end{cases}$$

onde N_{es0B} e N_{es0A} são as taxas iniciais de geração de elétrons devido à emissão de superfície, baixa e alta [1/s], respectivamente e, $E_{DP}[i]$ e $E_{DP}[i-1]$ são os campos elétricos de ocorrência das DPs, atual e anterior [V/m], respectivamente.

No entanto, a quantidade de cargas N_{DP} que pode ser despreendida por meio da emissão de superfície decai com o tempo, e a taxa de decaimento considerada no modelo é exponencial com constante de tempo τ_{dec} . Logo, τ_{dec} é a constante de tempo de decaimento da carga efetiva de superfície.

A taxa de geração de elétrons, além de depender da descarga anterior, é dependente do campo elétrico e da temperatura da cavidade [21][44]. Desta forma, no modelo, a expressão final para a obtenção da taxa de geração de elétrons é dada pela Equação (3-5) [4]:

$$N_{es}(t) = N_{DP} \cdot e^{\left(\frac{t-t_{DP}}{\tau_{dec}}\right)} \cdot e^{\left|\frac{E_{cav}(t) \cdot T_{mat}}{E_{rup0} \cdot T_{amb}}\right|} \quad (3-5)$$

sendo T_{mat} a temperatura do material e T_{amb} a temperatura ambiente, ambas na escala Kelvin.

3.3.2 Ionização devido ao Volume da Cavidade

As fontes de ionização devido ao volume da cavidade são, ionização de gases por radiação devido à energia de fótons e despreendimento de elétrons por íons negativos [21].

No modelo considerado é assumido que sempre há elétrons livres pela ionização devido ao volume da cavidade e, matematicamente, a taxa de emissão de elétrons é considerada como sendo uma constante, indicada por N_{ev} .

3.3.3 Probabilidade de Ocorrência da DP

A taxa de geração de elétrons, que depende da emissão de elétrons livres pela superfície da cavidade e pela ionização devido ao volume da cavidade, está relacionada com o caráter estatístico do acontecimento da descarga parcial. Desta forma, no modelo utilizado, a confirmação do processo de descarga parcial é obtida por meio do cálculo da probabilidade de ocorrência da DP, que, matematicamente, pode ser calculada pela Equação (3-6):

$$P = N_g(t) \cdot \Delta t_{semDP} \quad (3-6)$$

sendo P a probabilidade de ocorrência da DP e Δt_{semDP} o passo de integração durante o período que não há ocorrência da descarga.

O valor calculado da probabilidade de ocorrência da descarga parcial é comparado com um número aleatório R , que varia entre 0 e 1. Caso P seja maior que R o processo de descarga é confirmado, caso contrário não há descarga.

3.4 Decaimento da Carga de Superfície

O decaimento da carga de superfície por meio da condução ao longo da parede da cavidade é um processo dependente do tempo e é considerado no modelo utilizado, por exemplo em [4][30][36][38]. Durante o processo de descarga, as primeiras cargas que chegam na superfície da cavidade, antes de serem presas, repelem as próximas cargas as quais permanecem na superfície da cavidade por um certo período ou podem se mover ao longo da parede da cavidade antes de serem presas [4]. Logo, depois da ocorrência de uma descarga parcial, a quantidade de cargas que ainda permanecem livres na superfície da cavidade podem reduzir devido à condução da parede da superfície da cavidade, resultando em recombinação de cargas [4].

No modelo apresentado, este decaimento da carga presente na superfície da cavidade é modelado como sendo dependente do campo elétrico e da temperatura da cavidade. Desta forma, com a utilização de elementos finitos, pode-se alterar a condutividade da superfície da cavidade ($\sigma_{sup}(t)$) a fim de modelar o decaimento da carga de superfície devido à condução da parede da superfície da cavidade.

O movimento das cargas de superfície é modelado como sendo dependente do sentido e intensidade do campo elétrico no centro da cavidade ($E_{cav}(t)$) e do campo elétrico devido às cargas na superfície da cavidade ($E_s(t)$) [4]. Conforme já apresentado, quando aplica-se tensão em um material isolante aparece um campo elétrico no material isolante, denotado por $E_0(t)$. Caso não haja descarga parcial, o campo elétrico no centro da cavidade é igual $f_c E_0(t)$ e, conforme visto anteriormente, depois de ocorrer a primeira DP, aparece na cavidade o campo elétrico devido ao acúmulo das cargas de superfície ($E_s(t)$), fazendo com que o campo no centro da cavidade reduza, e, neste caso, $E_{cav}(t)$ é diferente de $f_c E_0(t)$. Considerando a Figura 3-2(a), quando $E_{cav}(t)$ tem sentido contrário de $E_s(t)$, as cargas acumuladas na superfície da cavidade, devido a descargas anteriores, tendem a se deslocar em direção ao centro das superfícies, e considera-se, portanto, que não há recombinação nas superfícies inferior e superior da cavidade o que não leva ao decaimento das cargas livres na superfície da cavidade.

Devido à aplicação de tensão alternada, o sentido do campo elétrico na cavidade é alterado. Logo, de acordo com a Figura 3-2(b), pode acontecer que $E_{cav}(t)$ e $E_s(t)$ tenham o mesmo sentido e, neste caso, as cargas acumuladas na superfície da cavidade devido a descargas anteriores tendem a se mover no sentido oposto ao ponto em que foram acumuladas. Desta forma, como há movimento de cargas positivas e negativas ao longo da parede da superfície da cavidade, ocorre recombinação destas cargas o que leva ao decaimento das cargas livres e, conseqüentemente, à redução do campo elétrico $E_s(t)$.

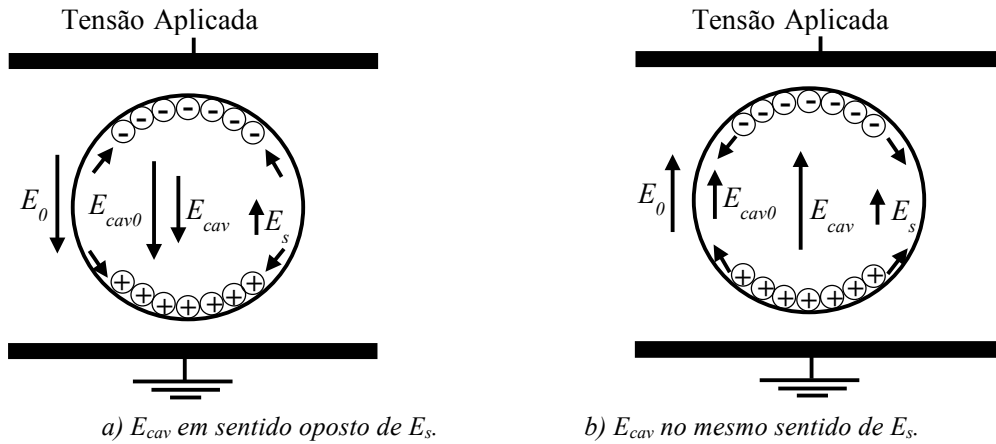


Figura 3-2: Movimento de cargas livres [4].

Para modelar o decaimento das cargas de superfície por meio da alteração da condutividade da superfície da cavidade, é necessário conhecer o campo elétrico devido às cargas acumuladas na superfície da cavidade em função das descargas anteriores, e no modelo que utiliza elementos finitos esse campo elétrico é calculado analiticamente a cada passo de integração pela Equação (3-7) [4]:

$$E_s(t) = E_{cav}(t) - f_c E_0(t) \quad (3-7)$$

Após a ocorrência da descarga, algumas cargas podem ficar livres e outras podem permanecer presas na superfície da cavidade. No modelo utilizado, o campo elétrico

devido às cargas de superfície imediatamente após o término de uma DP, $E_s(t_{DP})$, é assumido como sendo a soma do campo elétrico devido às cargas presas ($E_{spresa}(t_{DP})$) e o campo elétrico devido às cargas livres ($E_{slivre}(t_{DP})$). Ainda, no modelo é considerado que as cargas livres presentes na superfície da cavidade imediatamente após o término da DP não se prendem com o passar do tempo. Deste modo, a quantidade de cargas livres após uma DP ($q_{slivre}(t_{DP})$) pode ser calculada via elementos finitos por meio da integração da densidade de campo elétrico ao longo da superfície superior da cavidade, tal como mostrado pela Equação (3-8).

$$q_{slivre}(t_{DP}) = \int_S (D_{ssup}(t_{DP}) - D_{sinf}(t_{DP})) dS \quad (3-8)$$

Sendo $D_{ssup}(t_{DP})$ e $D_{sinf}(t_{DP})$ a densidade de campo elétrico dos lados superior e inferior da superfície superior da cavidade, respectivamente, no término do processo de descarga no instante t_{DP} .

Logo, o campo elétrico na superfície da cavidade devido às cargas livres é calculado por uma simples proporcionalidade:

$$E_{slivre}(t_{DP}) = \left| \frac{q_{slivre}(t_{DP})}{q_{DPtotal}(t_{DP})} \right| E_s(t_{DP}) \quad (3-9)$$

sendo $q_{DPtotal}$ a carga total devido a todas as descargas parciais até o tempo t_{DP} (cuja forma de obtenção é mostrada adiante) conforme mostrado pela Equação (3-10)

$$q_{DPtotal}(t_{DP}) = \sum_{i=1}^n q_{DPpre}[i] \quad (3-10)$$

sendo n o número de descargas até o instante t_{DP} . Consequentemente, o campo elétrico devido às cargas presas imediatamente após a descarga ocorrer pode ser calculado por:

$$E_{spresa}(t_{DP}) = E_s(t_{DP}) - E_{slivre}(t_{DP}) \quad (3-11)$$

Quando $E_s(t)$, no processo de decaimento de carga da superfície, atingir o valor de $E_{sqpresa}$, significa que não há mais cargas livres e, portanto, não pode mais haver decaimento de carga na parede da superfície. O decaimento da carga de superfície por meio da condução da parede da cavidade é dependente da temperatura na superfície da cavidade ($T_{sup}(t)$) e do campo elétrico na superfície da cavidade ($E_{sup}(t)$), uma vez que a condutividade da superfície da cavidade é dependente do ambiente da cavidade e do material [45].

Assim, a fim de modelar o decaimento da carga de superfície devido à condução da parede da cavidade, caso o campo elétrico devido às cargas na superfície ($E_s(t)$) e o campo elétrico na cavidade ($E_{cav}(t)$) tenham o mesmo sentido e ($E_s(t)$) for maior que

o campo elétrico na superfície devido às cargas presas ($E_{sqpresa}(t)$), a condutividade da superfície da cavidade é aumentada de um valor inicial (σ_{sup0}) para um valor mais elevado. No modelo apresentado em [4] a condutividade da superfície da cavidade para modelar o decaimento da carga de superfície é calculada e acordo com a Equação (3-12) [46][47][48].

$$\sigma_{sup}(t) = \sigma_{sup0} e^{(\alpha|E_{sup}(t)| + \beta \cdot T_{sup}(t))} \quad (3-12)$$

Sendo α e β os coeficientes de *stress* e térmico, respectivamente.

No entanto, foi verificado que os valores calculados pela Equação (3-12) na maioria das vezes são valores muito altos o que levam ao decaimento muito rápido do campo elétrico devido às cargas de superfície. Desta forma, nesta dissertação, o decaimento das cargas da superfície da cavidade é modelado utilizando um valor constante de condutividade (σ_{supmax}).

Quando o campo elétrico na cavidade ($E_{cav}(t)$) possui sentido contrário do campo elétrico devido às cargas de superfície ($E_s(t)$), a condutividade da superfície da cavidade é ajustada para o seu valor inicial (σ_{sup0}), de tal forma que não haja mais decaimento de carga.

Dessa forma, no modelo, para determinar a condutividade da superfície da cavidade usa-se:

$$\text{Se: } \frac{E_{cav}(t)}{E_s(t)} > 0 \text{ e } E_s(t) > E_{spresa}(t) \rightarrow \sigma_{sup}(t) = \sigma_{supmax}$$

Caso contrário, $\sigma_{sup}(t) = \sigma_{sup0}$.

3.5 Elevação de Temperatura

Quando o processo de descarga parcial é confirmado, a cavidade passa de isolante para condutor até que a descarga se encerre. Durante o processo de ionização, elétrons livres colidem com moléculas neutras de gás, resultando na liberação de um elétron da molécula de gás e energia na forma de calor, levando a um aumento da temperatura da cavidade [4]. Este aumento da temperatura pode levar ao aumento da pressão na cavidade, o que pode modificar o campo elétrico de ruptura, uma vez que o campo elétrico de ruptura depende da pressão na cavidade [3][4][21], tal como mostrado pela Equação (3-2). Desta forma, considerando que o ar na cavidade comporta-se como um gás ideal, e que o volume da cavidade permanece constante após os processos de descarga, a pressão na cavidade a cada passo de integração pode ser obtida pela Equação (3-13) [4]:

$$P_{cav}(t) = P_{cav}(t - \Delta t) \cdot \frac{T_{cav}(t)}{T_{cav}(t - \Delta t)} \quad (3-13)$$

Adicionalmente, tal como apresentado desde o modelo generalizado [21], o campo elétrico de extinção também depende da pressão. No modelo apresentado, o campo elétrico de extinção é considerado como sendo proporcional à pressão, tal como apresentado na Equação (3-14) [4][29],

$$E_{ext}(t) = E_{ext}(t - \Delta t) \frac{P_{cav}(t)}{P_{cav}(t - \Delta t)} \quad (3-14)$$

sendo E_{ext0} o campo elétrico de ruptura inicial, P_{cav} a pressão na cavidade e Δt o passo de integração.

Logo, utilizando a Equação (3-13) pode-se atualizar a Equação (3-14) e obter a relação direta da relação entre campo de ruptura e temperatura, conforme mostrado pela Equação (3-15).

$$E_{ext}(t) = E_{ext}(t - \Delta t) \cdot \frac{T_{cav}(t)}{T_{cav}(t - \Delta t)} \quad (3-15)$$

Apesar de no modelo apresentado em [4] ser possível considerar a elevação de temperatura devido a cada descarga, no modelo utilizado nesta dissertação tal efeito não é considerado, uma vez que os resultados apresentados em [4], considerando ou não a elevação de temperatura devido à DP, são similares. Nas simulações desta dissertação em que a temperatura inicial da geometria é alterada, somente os valores dos parâmetros usados na simulação são calculados para cada valor de temperatura, conforme é explicado mais adiante.

3.6 Cálculo das Cargas

O sinal gerado por uma descarga parcial é basicamente um pulso de corrente. No entanto, as descargas parciais são comumente expressadas como cargas elétricas. Existem dois tipos de cargas utilizados no estudo de descargas parciais, a carga real ou física e a carga aparente ou induzida. No modelo utilizado, uma vez que a descarga parcial é modelada dinamicamente, é possível calcular ambas as cargas real e aparente. Uma vantagem em se usar elementos finitos é que as cargas reais e aparentes podem ser calculadas com mais facilidade com relação a modelos com parâmetros concentrados [4].

A carga real (q_{DPRe}) representa a carga acumulada na parede da superfície da cavidade devido às descargas parciais, sendo calculada pela integração no tempo da corrente que flui pela cavidade, tal como mostrado pela Equação (3-16) [4],

$$q_{DPre} = \int_t^{t+dt} I_{cav}(t) \cdot dt \quad (3-16)$$

sendo I_{cav} a corrente na cavidade gerada pela descarga parcial, obtida por meio da integração da densidade de corrente na seção transversal da cavidade (J_{cav}), a qual é obtida pelo método de elementos finitos, conforme Equação (3-17),

$$I_{cav} = \int_{S_{cav}} J_{cav}(t) \cdot dS \quad (3-17)$$

na qual S_{cav} é área da seção transversal da cavidade.

A carga aparente (q_{DPap}) representa a carga induzida na superfície (ou eletrodo) de medição devido às descargas parciais, sendo calculada pela integração no tempo da corrente que flui para a superfície que se encontra aterrada, tal como mostrado pela Equação (3-18),

$$q_{DPap} = \int_t^{t+dt} I_{ele}(t) \cdot dt \quad (3-18)$$

sendo I_{ele} a corrente obtida por meio da integração da densidade de corrente na área da seção transversal da superfície aterrada (J_{ap}) que, tal como para a densidade de corrente na cavidade, é obtida pelo método de elementos finitos, conforme Equação (3-19),

$$I_{ele} = \int_{S_{ele}} J_{ap}(t) \cdot dS \quad (3-19)$$

na qual S_{ele} é área da seção transversal da superfície aterrada.

3.7 Processo de Descarga

Entendidos os fenômenos ligados à descarga parcial em uma cavidade presente no isolante, neste momento, a metodologia usada para simular o processo da DP nesta dissertação é apresentada. O modelo utilizado nesta dissertação usa um código que interage com o *software* de elementos finitos Comsol tal como apresentado pela Figura 3-3:

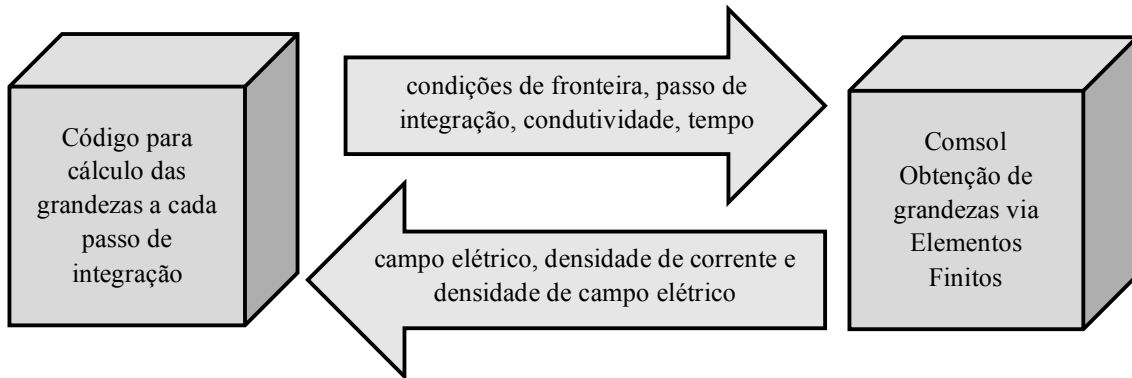


Figura 3-3: Interface entre código e método dos elementos finitos.

Conforme pode ser visto na Figura 3-3, para simulação há um código que efetua os cálculos necessários e obtém as condições de fronteira usadas pelo *software* de elementos Finitos, que obtém o campo elétrico, densidade de corrente e densidade de campo elétrico, e retorna os resultados para o código, que os utiliza para determinar as novas condições de fronteira; passo de integração, condutividade e tempo, que são novamente utilizados pelo *software* de elementos finitos para uma nova obtenção das grandezas necessárias. Este processo se repete até que o tempo de simulação tenha sido atingido.

A fim de entender o processo de interação entre código e *software* de elementos finitos para a modelagem utilizada, seja a Figura 3-4, a qual apresenta o fluxograma básico para simulação do processo de descarga parcial.

De acordo com o fluxograma apresentado na Figura 3-4 inicia-se a simulação com a definição das constantes utilizadas no modelo. Em seguida, calcula-se o campo elétrico no centro da cavidade caso não haja descarga parcial ($f_c E_0$).

Vale ressaltar que como a tensão aplicada na geometria é senoidal, o campo elétrico no centro da cavidade também é senoidal, logo $f_c E_0(t)$ é máximo quando a tensão aplicada tiver o seu valor de pico.

Posteriormente, o tempo de simulação é inicializado, fazendo $t = 0$ s. Para este valor de tempo não há necessidade de calcular as grandezas via elementos finitos, uma vez que, considerando uma alimentação senoidal com ângulo de fase nulo, a tensão aplicada é zero e, conseqüentemente, como ainda não houve descarga, os campos E_{cav} e E_s são nulos. Desta forma, o tempo é incrementado por Δt_{semDP} que representa o passo

de integração quando não há DP. É importante ressaltar que são utilizados dois passos de integração, um para quando não há descarga (Δt_{semDP}) e outro para quando há (Δt_{comDP}), pois o processo de descarga é muito rápido, ocorrendo na ordem de nano segundos, já o período sem descarga depende da frequência da tensão aplicada e, a fim de reduzir o tempo de simulação quando não há descarga parcial, o passo de integração pode ser maior sem prejuízo dos resultados.

Em sequência, as condições de fronteira, tais como, condutividade da cavidade e da superfície da cavidade, tempo, passo de integração são enviados do código para o *software* de elementos finitos que obtém a distribuição de campo elétrico na geometria utilizada. O valor de campo elétrico no centro da cavidade (E_{cav}) é repassado ao código.

De posse do valor de campo elétrico no centro da cavidade, o campo elétrico devido ao acúmulo de cargas na superfície da cavidade (E_s) é calculado algebricamente utilizando a Equação (3-7).

A fim de modelar o decaimento de cargas na superfície da cavidade deve-se atribuir um valor para a condutividade da superfície da cavidade (σ_{sup}). Desta forma, caso o campo elétrico no centro da cavidade (E_{cav}) e o campo devido as cargas de superfície (E_s) tiverem o mesmo sinal, ou seja, estejam no mesmo sentido, e o campo elétrico devido às cargas de superfície seja maior que o campo elétrico devido às cargas de superfície livres (E_{slivre}), a condutividade é aumentada para σ_{supmax} . Caso contrário, a condutividade da superfície da cavidade é ajustada para seu valor inicial (σ_{sup0}).

Em seguida, o campo elétrico no centro da cavidade (E_{cav}) é comparado com o campo elétrico de ruptura (E_{rup}), caso E_{cav} seja menor que E_{rup} não há descarga, o tempo é incrementado de Δt_{semDP} , as novas condições de fronteira são determinadas e o processo se repete. Caso E_{cav} seja maior que E_{rup} há a possibilidade de ocorrência da DP e deve-se, portanto, calcular a taxa de geração de elétrons totais (N_g), que é composta por duas parcelas, devido à emissão de superfície (N_{es}) e pela ionização devido ao volume da cavidade (N_v). De posse da taxa de geração de elétrons total (N_g), a probabilidade de ocorrência da descarga parcial (P) é calculada usando-se a Equação (3-6) e comparada com um número aleatório (R) que varia entre 0 e 1. Caso P seja menor que R o processo de descarga não é confirmado e não há, portanto, DP, o tempo é incrementado por Δt_{semDP} e o processo se repete. Caso P seja maior que R haverá DP, visto que as duas condições para ocorrência de descarga parcial foram satisfeitas, ou seja, o campo elétrico no centro da cavidade é maior que o campo elétrico de ruptura e existem elétrons livres disponíveis para iniciar a avalanche.

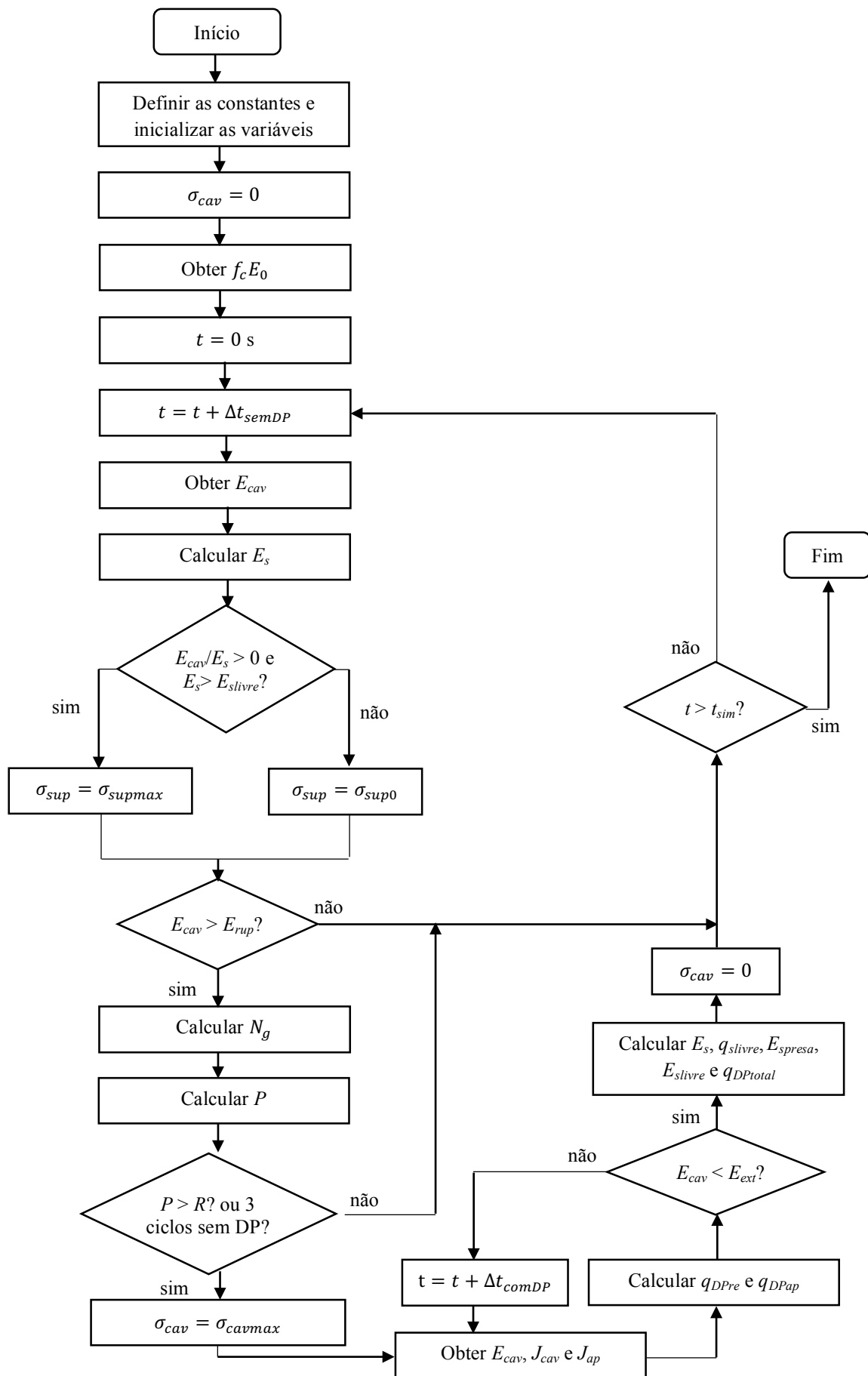


Figura 3-4: Fluxograma do código para simulação de DP.

Confirmado o processo de descarga, a condutividade da cavidade (σ_{cav}) é aumentada para σ_{cavmax} e a cavidade passa de isolante para condutor. As novas condições de fronteira são então enviadas ao *software* de elementos finitos que obtém as distribuições de campo elétrico, densidade de corrente elétrica e densidade de campo elétrico. Com a distribuição de densidade de corrente na cavidade e na superfície aterrada são calculadas as correntes que fluem na cavidade (I_{cav}) e para a superfície aterrada (I_{ele}) utilizando as Equações (3-17) e (3-19), respectivamente. De posse das correntes, as cargas real (q_{DPRe}) e aparente (q_{DPAp}) são obtidas utilizando as Equações (3-16) e (3-18), respectivamente.

Após o cálculo das cargas real e aparente, o campo elétrico no centro da cavidade (E_{cav}) é comparado com o campo elétrico de extinção (E_{ext}), caso E_{cav} seja menor que E_{ext} o processo de descarga parcial é encerrado, caso contrário o tempo é incrementado pelo passo de integração durante o processo de DP (Δt_{comDP}), as novas condições de fronteiras são determinadas e o processo se repete. Vale ressaltar que iniciado o processo de DP com o aumento da condutividade da cavidade, o campo elétrico no centro da cavidade reduz e a corrente aumenta subitamente e, nos próximos passos de integração o campo elétrico no centro da cavidade continua a reduzir e a corrente na cavidade começa a reduzir visto que com a redução do campo elétrico na cavidade a tensão na cavidade também reduz.

Finalizado o processo da DP, são efetuados os cálculos do campo elétrico devido ao acúmulo de cargas na superfície da cavidade (E_s), das cargas livres na superfície da cavidade (q_{slivre}), do campo elétrico devido às cargas de superfície livres (E_{slivre}), da carga total devido a todas as descargas ($q_{DPtotal}$) e do campo elétrico devido às cargas de superfície presas (E_{spresa}), utilizando as Equações (3-7), (3-8), (3-9), (3-10) e (3-11), respectivamente.

Posteriormente, a condutividade da cavidade é ajustada para seu valor inicial, ou seja, $\sigma_{cav} = 0$, visto que a cavidade volta a se comportar como isolante quando não há DP, e o tempo é então incrementado pelo passo de integração quando não há descarga (Δt_{semDP}). Todo esse processo se repetirá até o instante em que o tempo de simulação tenha sido atingido.

Adicionalmente, percebeu-se por meio de simulações que caso decorra um tempo considerável após uma descarga pode não ocorrer uma próxima descarga, pois à medida que o tempo transcorrido após uma descarga aumenta, a taxa de emissão de elétrons diminui, conforme Equação (3-5), reduzindo, consequentemente, a probabilidade de ocorrência da DP. Neste sentido, caso decorra 3 ciclos da tensão aplicada sem a ocorrência da descarga, nesta dissertação, o código força a ocorrência da descarga parcial.

3.8 Equacionamento em Elementos Finitos

Para simulação de descargas parciais, de acordo com o modelo utilizado, é necessário o estudo eletromagnético, tendo em vista a necessidade de obtenção de campo elétrico, densidade de campo elétrico e densidade de corrente. Vale ressaltar que o estudo deve considerar o efeito transitório, ou seja, as equações devem levar em consideração as variáveis dependentes do tempo.

Para obtenção da distribuição de potencial elétrico e, conseqüentemente, campo elétrico, parte-se inicialmente da equação de Gauss para Campo Elétrico, a qual pode ser vista a seguir:

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{D} = \rho_v \quad (3-20)$$

sendo D a densidade de campo elétrico e ρ_v a densidade de carga elétrica.

Para um dielétrico linear, homogêneo e isotrópico, ou seja, que possui a mesma propriedade em todas as direções, pode-se dizer que:

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} \quad (3-21)$$

Onde ϵ é a permissividade do material dielétrico e E é campo elétrico.

Além disso, sabe-se que.

$$\vec{E} = -\vec{\nabla}V \quad (3-22)$$

Onde V é o potencial elétrico.

Substituindo a Equação (3-22) na Equação (3-21) e levando o resultado para a Equação (3-20) obtém-se:

$$-\vec{\nabla} \cdot \epsilon \vec{\nabla}V = \rho_v \quad (3-23)$$

Adicionalmente, pela equação da continuidade tem-se que:

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{J} = -\frac{\partial \rho_v}{\partial t} \quad (3-24)$$

Sabe-se que:

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} = -\sigma \vec{\nabla}V \quad (3-25)$$

Sendo σ a condutividade elétrica.

Substituindo as Equações (3-25) e (3-23) em (3-24), obtém-se:

$$-\vec{\nabla} \cdot (\sigma \vec{\nabla} V) - \vec{\nabla} \cdot \frac{\partial}{\partial t} (\epsilon \vec{\nabla} V) = 0 \quad (3-26)$$

Logo, para obtenção do potencial elétrico via elementos finitos, a Equação (3-26) deve ser solucionada. As outras grandezas, campo elétrico, densidade de campo elétrico e densidade de corrente, são obtidas a partir do potencial elétrico.

Desta forma, percebe-se que para obtenção da distribuição de potencial e, consequentemente, campo elétrico, deve-se conhecer a condutividade elétrica (σ) e a permissividade (ϵ) dos materiais.

3.9 Implementação do Modelo

Uma vez apresentada a teoria acerca do modelo utilizado para simulação de descargas parciais, a partir de agora tem-se por objetivo implementar o modelo proposto, ou seja, elaborar o código que interage com o *software* de elementos finitos e fazer algumas simulações a fim de se verificar se o código elaborado está adequado e os resultados obtidos são coerentes com os resultados mostrados por Illias [4], para que o modelo possa ser usado na bobina. Desta forma, inicialmente, a geometria é apresentada, os parâmetros usados na simulação são definidos e, finalmente, os principais resultados são apresentados.

3.9.1 Geometria

A geometria a ser simulada, inicialmente, é apresentada na Figura 3-5.

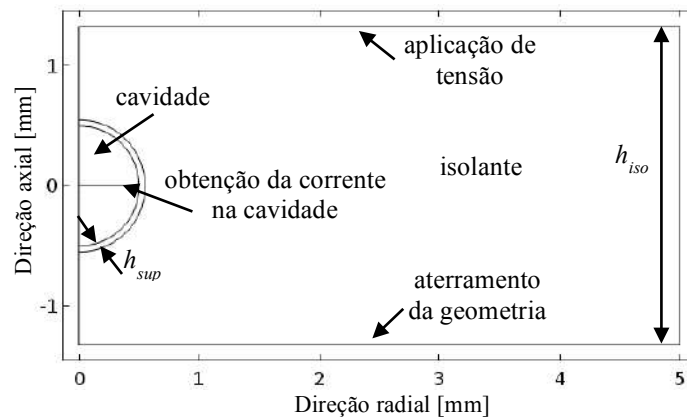


Figura 3-5: Geometria cilíndrica com cavidade no centro.

Conforme pode ser visto na Figura 3-5, o modelo é composto por uma geometria com simetria axial 2D, ou seja, um isolante modelado por um retângulo e uma cavidade por um semicírculo, que em função da simetria, representam um cilindro e uma esfera, respectivamente. O uso da simetria axial permite simular uma geometria 3D em uma modelagem 2D, o que confere redução do tempo de simulação devido ao menor número de elementos na formação da malha. Adicionalmente, há dois semicírculos concêntricos, que existem com o objetivo de modelar o decaimento da carga de superfície por meio da alteração da condutividade da superfície da cavidade, que é modelada pela região entre os dois círculos, denotada pela espessura h_{sup} .

A tensão é aplicada na superfície superior do isolante, representada pela aresta superior do retângulo, enquanto que a superfície inferior, ou aresta inferior do retângulo, é aterrada.

3.9.2 Definição dos Parâmetros de Simulação

Conforme destacado nas equações apresentadas anteriormente existe um grande número de parâmetros que devem ser conhecidos para o uso do modelo de simulação. A Tabela 3-1 apresenta os parâmetros que são constantes durante a simulação.

Tabela 3-1: Parâmetros constantes.

Parâmetro	Símbolo	Valor
Raio do isolante [mm]	r_{iso}	5
Altura do isolante [mm]	h_{iso}	2,65
Raio da cavidade [mm]	$raio$ ou a	0,5
Espessura da superfície da cavidade [mm]	h_{sup}	0,05
Amplitude da tensão aplicada [V]	V_{amp}	11267,65
Frequência da tensão aplicada [Hz]	f	60
Temperatura ambiente [°C]	T_{amb}	20
Temperatura da geometria [°C]	T_{mat}	20
Passo de integração sem DP [s]	Δt_{semDP}	$1/(500 \cdot f)$
Passo de integração com DP [s]	Δt_{comDP}	$1 \cdot 10^{-9}$
Permissividade relativa do isolante	ϵ_{riso}	6
Permissividade relativa da cavidade	ϵ_{rcav}	1
Permissividade relativa da superfície da cavidade	ϵ_{rsup}	6
Condutividade do isolante [S/m]	σ_{iso}	$2,01 \cdot 10^{-15}$
Condutividade da cavidade sem DP [S/m]	σ_{cav0}	0
Condutividade da cavidade com DP [S/m]	σ_{cavmax}	$5 \cdot 10^{-3}$
Condutividade da superfície da cavidade [S/m]	σ_{sup0}	$2,01 \cdot 10^{-15}$

Com relação às dimensões da geometria, o isolante cilíndrico tem raio (r_{iso}) igual 5 mm e altura (h_{iso}) 2,65 mm. A cavidade é modelada com raio igual a 0,5 mm. Na superfície da cavidade é usado uma espessura (h_{sup}) de 0,05 mm, valor este investigado em [4][36].

Como alimentação é utilizada uma tensão senoidal que tem frequência de 60 Hz e amplitude (V_{amp}) 11,27 kV, que representa a amplitude da tensão fase neutro de uma máquina de 13,8 kV nominal. Como temperatura ambiente é utilizado o valor de 20 °C, e a temperatura da geometria, inicialmente, é considerada como sendo igual à temperatura ambiente.

Conforme destacado anteriormente, a fim de reduzir o tempo de simulação são utilizados dois passos de integração diferentes, um quando não há descarga parcial (Δt_{semDP}) e outro quando há (Δt_{comDP}). O valor de Δt_{semDP} é dependente da frequência da tensão de alimentação e o valor de Δt_{comDP} foi escolhido como sendo $1 \cdot 10^{-9}$ s, uma vez que valores maiores que estes poderiam levar a resultados imprecisos e valores menores tomariam mais tempo de simulação [4].

Para este modelo, existem três materiais, o isolante, a superfície da cavidade, utilizada para modelagem do decaimento da carga de superfície, e a cavidade de ar. Na simulação, para cada material, de acordo com a Equação (3-26) é necessário conhecer a condutividade elétrica (σ) e a permissividade (ϵ), para realizar a solução eletromagnética. Como material isolante foi escolhida a mica e, uma vez que a superfície da cavidade é considerada como sendo parte do material isolante, os seus parâmetros são os mesmos da mica [4], exceto quando há o decaimento de cargas de superfície, em que neste caso a condutividade da superfície da cavidade é alterada para um valor superior, dado por σ_{supmax} . A cavidade é considerada como sendo de ar, logo possui permissividade relativa (ϵ_{rcav}) igual a 1 e condutividade, quando não há descarga (σ_{cav0}), igual a zero. No entanto, quando o processo de DP é confirmado, este valor é alterado para um valor maior (σ_{cavmax}), numericamente igual a $5 \cdot 10^{-3}$ S/m. De acordo com [4] valores menores que $5 \cdot 10^{-3}$ S/m levariam a maiores tempos de simulação para pequenos ganhos em precisão, enquanto que valores maiores causariam um rápido decaimento do campo elétrico no centro da cavidade a valores menores que o campo elétrico de extinção e originando grandes magnitudes de descarga.

A Tabela 3-2 mostra os parâmetros dependentes da análise a ser realizada, ou seja, grandezas que devem ser definidas para cada caso de simulação simulados nesta dissertação.

Tabela 3-2: Parâmetros variáveis.

Parâmetro	Símbolo	Valor
Campo elétrico de ruptura [kV/mm]	E_{rup}	3,4
Campo Elétrico de extinção [kV/mm]	E_{ext}	0,585
Taxa de geração de elétrons devido ao volume da cavidade [s^{-1}]	N_v	6,4
Taxa de emissão de elétrons alta [s^{-1}]	N_{es0A}	12573
Taxa de emissão de elétrons baixa [s^{-1}]	N_{es0B}	6286
Condutividade máxima da superfície da cavidade [S/m]	σ_{supmax}	$3,57 \cdot 10^{-9}$
Constante de tempo de decaimento de carga de superfície [s]	τ_{dec}	$2 \cdot 10^{-3}$

Os valores mostrados na Tabela 3-1 e na Tabela 3-2 são os valores escolhidos para simular o modelo cilíndrico, bem como os utilizados para simulação do caso base (caso em que a bobina é simulada para comparação com os demais casos). O caso base é o caso da bobina utilizado para comparar com os outros casos que são obtidos por meio da variação de certos parâmetros, tal como é apresentado no próximo capítulo.

Os parâmetros variáveis apresentados na Tabela 3-2 foram definidos para o caso base, para o qual tem-se uma cavidade de 0,5 mm e espessura do isolamento de 2,65 mm. Em função dos casos que são utilizados na simulação da bobina no próximo capítulo, tais parâmetros são alterados. Vale ressaltar que em [4] os parâmetros variáveis são escolhidos para melhor ajustar os resultados das medições com os resultados simulados, sendo, portanto, difícil encontrar relações que valham para todos os casos simulados.

Neste sentido, nessa dissertação são feitas algumas considerações, as quais são descritas em sequência, para obtenção destes parâmetros, uma vez que não é objetivo neste momento realizar medições práticas.

O campo elétrico de ruptura (E_{rup}), de acordo com a Equação (3-2), dentre outros parâmetros, depende da pressão na cavidade e do raio da cavidade paralelo ao campo aplicado. Desta forma, com base nos resultados apresentados em [4], foi escolhido o valor de 3,4 kV/mm para a cavidade de 0,5 mm de raio.

Já o campo elétrico de extinção (E_{ext}), foi considerado como sendo dado pela Equação (3-27), conforme usado em [44]. Desta forma, para o campo de ruptura de 3,4 kV/mm e raio 0,5 mm, obtém-se a pressão na cavidade de acordo com Equação (3-2) e, consequentemente, o campo elétrico de extinção, cujo valor para o caso base é 0,585 kV/mm.

$$E_{ext} = 0,35 \cdot E_{lp} \cdot P_{cav} \quad (3-27)$$

A taxa de geração de elétrons devido ao volume da cavidade (N_v) é mantida constante durante cada simulação. Neste trabalho, por simplicidade, o valor utilizado para N_v foi considerado como sendo proporcional à expressão (3-28), com base em [21] [41] [44],

$$N_v \propto ab^2 \left(1 - \left(\frac{V_{rup}}{V_{amp}} \right)^2 \right) \quad (3-28)$$

sendo V_{amp} a tensão máxima aplicada, V_{rup} a tensão de ruptura e b o raio da cavidade na direção perpendicular ao campo aplicado, que no caso da cavidade esférica $a = b$. Para o caso base foi escolhido o valor de 6,4 com base em [4].

Nesta dissertação, por simplicidade, foi considerado que as taxas iniciais de emissão de superfície variam linearmente e inversamente com a área da superfície da cavidade. Com base nos valores apresentados em [4] para o caso base foi escolhido o valor de 12573 s^{-1} , para a taxa de emissão alta (N_{es0A}). Em todas as simulações a taxa de emissão baixa (N_{es0B}) foi considerada como sendo igual a $0,5N_{es0A}$.

Para a condutividade máxima da superfície da cavidade (σ_{supmax}) foi verificado para o modelo 3D da bobina que somente para valores maiores que aproximadamente $8 \cdot 10^{-10} \text{ S/m}$ há decaimento do campo elétrico devido às cargas de superfície. Desta forma, foi escolhido para o caso base o valor de $3,57 \cdot 10^{-9} \text{ S/m}$. Além disso, a condutividade da superfície da cavidade é considerada como sendo proporcional ao raio da cavidade com base em [21].

Com relação à constante de tempo de decaimento das cargas de superfície (τ_{dec}) foi considerada como sendo igual a $2 \cdot 10^{-3} \text{ s}$ para todas as simulações, exceto para o caso

em que há alteração na temperatura da geometria, em que foi considerada uma variação exponencial com a temperatura inicial da geometria.

A seguir, a fim de verificar a influência de cada característica nos resultados de simulação e entender o modelo utilizado, são realizadas simulações que mostram a evolução do modelo.

A fim de melhor observar alguns resultados, mais adiante, neste capítulo, são apresentadas as grandezas de interesse nas direções radial ($z = 0$) e axial ($r = 0$), as quais estão representadas pelas retas mostradas na Figura 3-6.

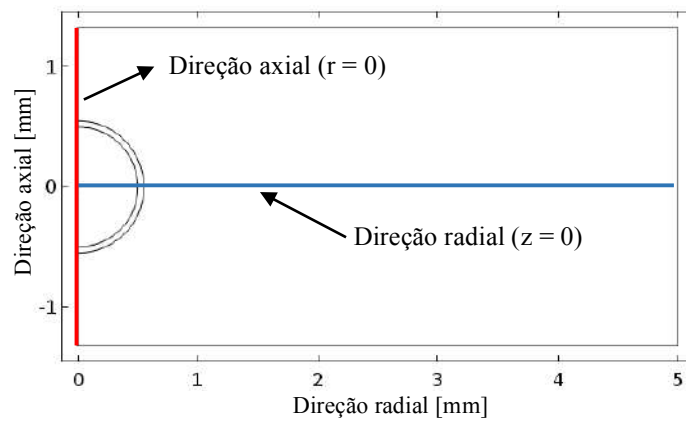


Figura 3-6: Direções axial ($r = 0$) e radial ($z = 0$).

3.9.3 Modelo 1 - simulação inicial

Como simulação inicial é considerado que a única condição para ocorrência da DP é que o campo elétrico no centro da cavidade seja superior ao campo elétrico de ruptura, ou seja, não é considerada a necessidade de elétrons livres para início da avalanche, o que leva a não haver atraso para início da descarga.

A fim de entender a influência de uma cavidade em um isolante, inicialmente são apresentados os resultados obtidos para o isolante cilíndrico sem cavidade, ou seja, quando não há descarga parcial. A Figura 3-7 mostra a malha gerada pelo *software* de elementos finitos para obtenção das grandezas no cilindro isolante de mica sem cavidade.

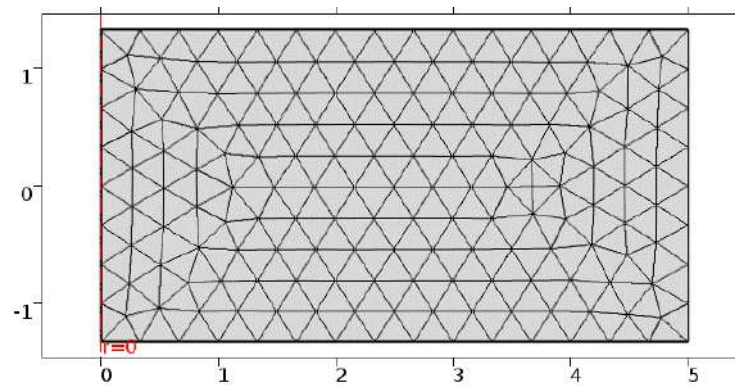


Figura 3-7: Malha para o cilindro sem cavidade.

A distribuição de tensão no isolante, no instante em que a tensão aplicada senoidal possui o valor de pico, pode ser vista na Figura 3-8. Conforme pode ser visto, a variação de tensão é uniforme em todo o isolante, o que é também comprovado pela Figura 3-9, em que a tensão axial (ao longo do eixo de simetria, ou seja, $r = 0$) é uma reta com inclinação constante.

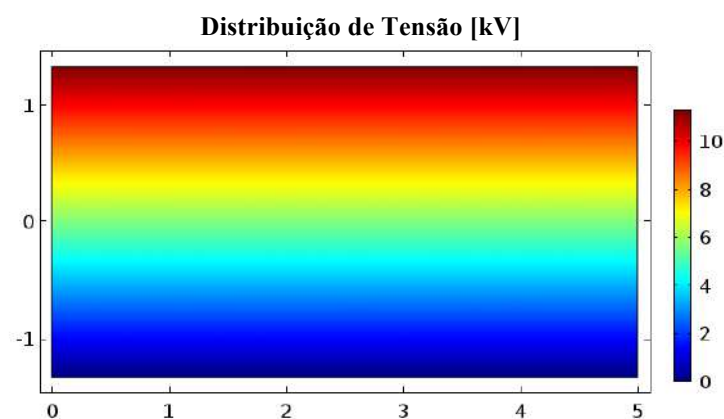


Figura 3-8: Distribuição de tensão no isolante cilíndrico sem cavidade.

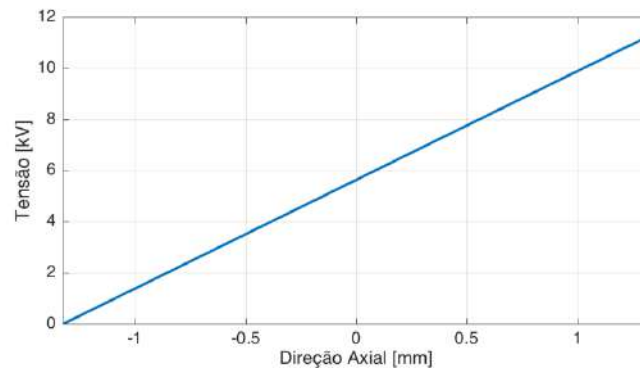


Figura 3-9: Tensão axial no isolante cilíndrico sem cavidade.

Quando não há cavidade no isolante, o campo elétrico é constante em todo o material isolante, uma vez que a permissividade é igual em toda a geometria. Na Figura 3-10 é apresentado o campo elétrico na direção axial no instante em que a tensão aplicada assume seu valor de pico, e tal como esperado, o campo elétrico é constante em todo o eixo de simetria.

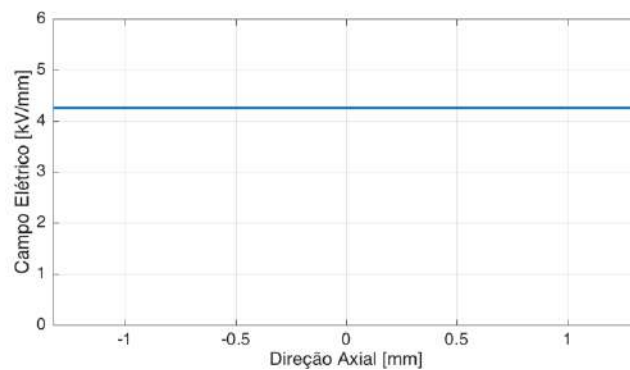


Figura 3-10: Campo elétrico axial no isolante cilíndrico sem cavidade.

Adicionalmente, na Figura 3-11 é mostrada a variação do campo elétrico no centro do isolante cilíndrico para um ciclo da tensão aplicada. O campo elétrico, tal como a tensão aplicada, é senoidal.

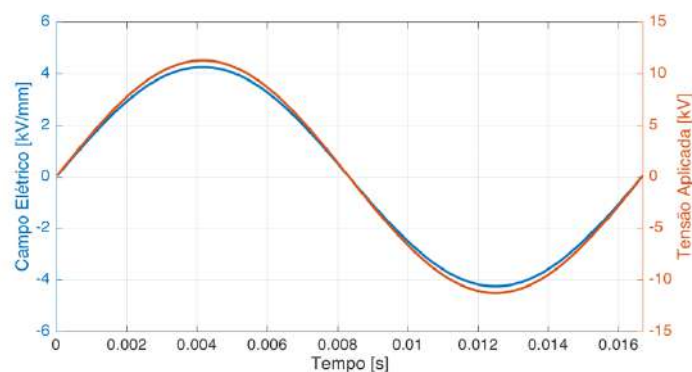


Figura 3-11: Campo elétrico no centro do cilindro sem DP e tensão aplicada.

Percebe-se, também, pela Figura 3-11, que o campo elétrico de pico é obtido no instante em que a tensão aplicada possui valor máximo, cujo valor é de aproximadamente 4,25 kV/mm.

Entendidos os resultados para a geometria cilíndrica sem cavidade, a partir de agora são apresentados os resultados com a presença da cavidade de ar no isolante cilíndrico de mica. A Figura 3-12 mostra a malha obtida pelo *software* de elementos finitos.

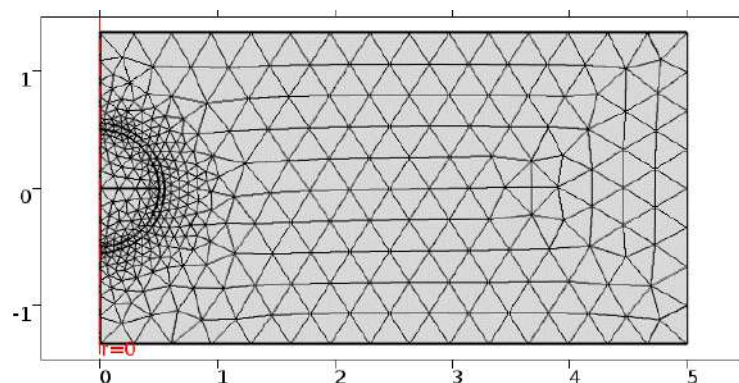


Figura 3-12: Malha para cilindro com cavidade.

Conforme pode ser visto, com a presença da cavidade o número de elementos aumenta quando comparado com a geometria sem cavidade mostrada na Figura 3-7, tendo em vista a redução do tamanho dos elementos da malha, principalmente na fronteira cavidade/isolante.

Com o intuito de verificar o fator de intensificação devido à presença da cavidade, a Figura 3-13 apresenta a forma de onda do campo elétrico no centro da cavidade para um ciclo da tensão aplicada. Conforme pode ser visto o campo elétrico no centro da cavidade com a presença da cavidade é superior ao campo elétrico na condição sem cavidade, atingindo o valor de aproximadamente 5,8 kV/mm.

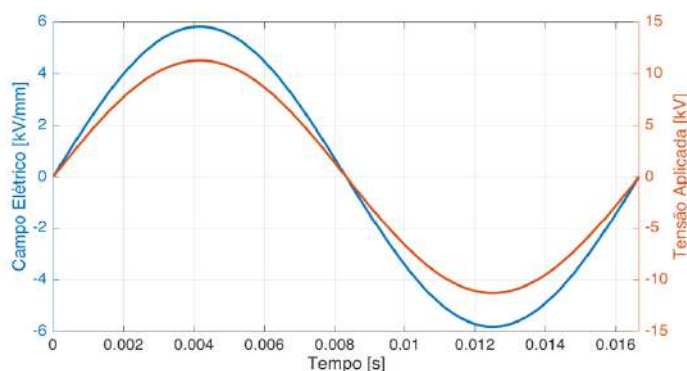


Figura 3-13: Campo elétrico no centro do isolante sem ocorrência de DP.

Assim, percebe-se que o campo elétrico no centro da cavidade atinge valores maiores que o campo elétrico de ruptura utilizado para a simulação (3,4 kV/mm), havendo, portanto, a possibilidade de ocorrência da DP. Como para esta simulação inicial

não é considerado o atraso para o início da descarga, sempre que o campo elétrico no centro da cavidade for superior ao campo elétrico de ruptura há descarga. A Figura 3-14 mostra o campo elétrico no centro da cavidade para 2 ciclos da tensão aplicada.

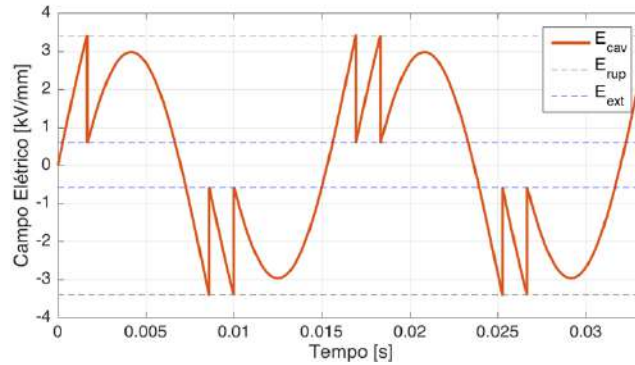


Figura 3-14: Modelo 1 - forma de onda do campo elétrico no centro da cavidade.

De acordo com a Figura 3-14 nota-se que sempre que o campo elétrico no centro da cavidade é superior ao campo elétrico de ruptura inicia-se o processo de descarga. Durante o processo de DP o campo elétrico no centro da cavidade reduz devido ao fato de que a cavidade passou do estado isolante para o estado condutor, por meio da alteração da condutividade da cavidade de 0 para σ_{cavmax} . O processo de descarga finaliza quando o campo elétrico no centro da cavidade é inferior ao campo elétrico de extinção (0,585 kV/mm). Na Figura 3-17 é possível ver no mesmo gráfico o comportamento do campo elétrico na cavidade para as duas condições, com DP (E_{cav}) e sem DP ($f_c E_0$).

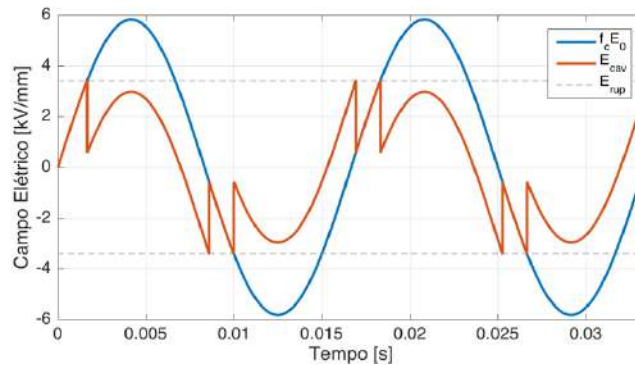


Figura 3-15: Modelo 1 - campo elétrico na cavidade sem e com DP.

Na Figura 3-15 nota-se que, inicialmente, E_{cav} e $f_c E_0$ são iguais e proporcionais à tensão aplicada. No entanto, quando E_{cav} supera o campo elétrico de ruptura e ocorre a descarga, a forma de onda do campo elétrico na condição com DP é deslocada pela diferença entre os campos elétricos de ocorrência e término da descarga, que para este modelo inicial são iguais aos campos de ruptura e extinção, respectivamente. Em razão desta diferença entre E_{cav} e $f_c E_0$ surge o campo elétrico devido ao acúmulo das cargas na superfície da cavidade (E_s). Desta forma, sempre que ocorre a descarga há acúmulo de cargas na superfície da cavidade o que altera o campo elétrico devido às cargas de superfície. Na Figura 3-18 é apresentada a forma de onda de E_s para os dois ciclos da tensão aplicada. Vale ressaltar que, como não foi considerado o decaimento das cargas na

superfície da cavidade, E_s só altera quando há uma descarga e permanece constante até o início de outra DP.

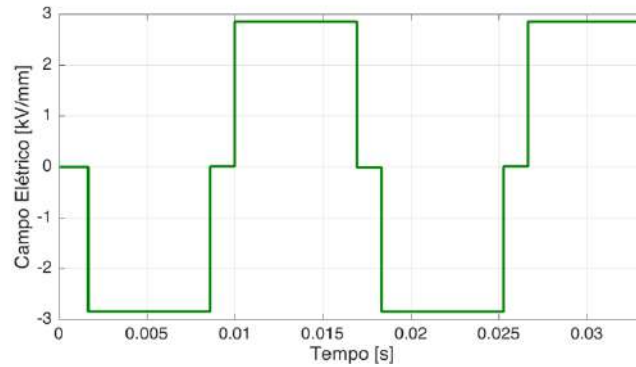


Figura 3-16: Modelo 1 - campo elétrico devido às cargas de superfície.

A fim de facilitar o entendimento dos instantes de alteração de cada forma de onda, a Figura 3-17 mostra os campos elétricos no mesmo gráfico.

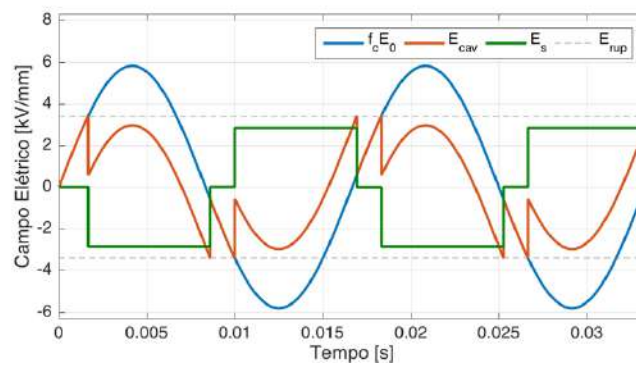


Figura 3-17: Modelo 1 - formas de onda de campo elétrico.

O modelo utilizado permite também obter a forma de onda de corrente na cavidade, a qual pode ser vista na Figura 3-18.

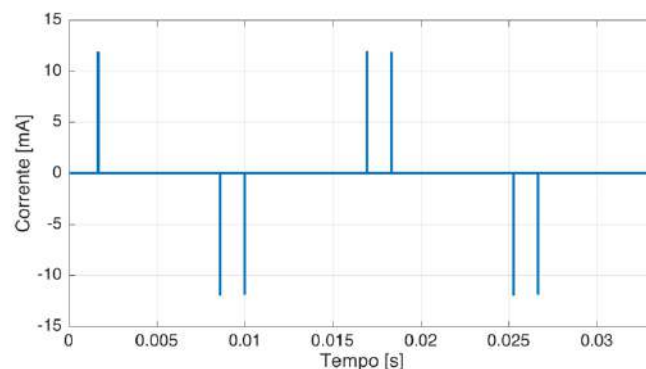


Figura 3-18: Modelo 1 - forma de onda da corrente na cavidade.

De acordo com a Figura 3-18 a corrente na cavidade é diferente de zero somente quando há descarga. Como não foi considerado o atraso para início da descarga, a amplitude da corrente é sempre a mesma para todas as DPs, cujo valor é de

aproximadamente 12 mA. Vale ressaltar que, como o processo de descarga dura cerca de dezenas de nano segundos, por meio da Figura 3-18 não é possível perceber a dinâmica da corrente na cavidade. No entanto, mais adiante são apresentados os gráficos ampliados para as grandezas de interesse durante o processo da DP.

De posse dos valores de corrente no centro da cavidade e na superfície aterrada da geometria, pode-se obter as cargas real e aparente, respectivamente, as quais podem ser visualizadas na Figura 3-19.

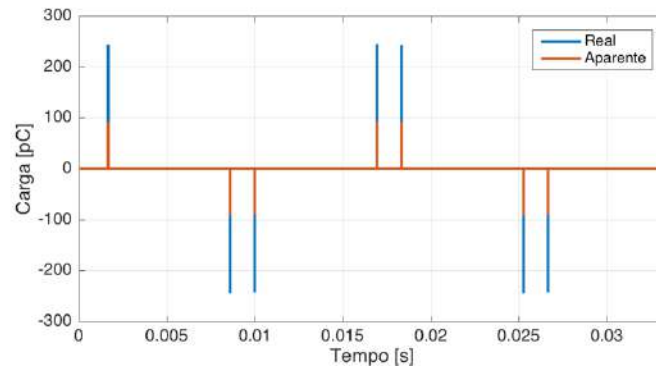


Figura 3-19: Modelo 1 - forma de onda de carga das DPs.

De acordo com a Figura 3-19, nota-se que as cargas possuem amplitude na ordem de pC e a carga aparente é menor que a real. Conforme apresentado anteriormente a carga aparente representa a carga que é induzida na superfície aterrada da geometria e, de acordo com [49], depende da geometria da simulação.

Com o objetivo de verificar o que a ocorrência da descarga parcial altera na distribuição das grandezas de interesse na geometria quando há e quando não há o processo de descarga, as figuras seguintes mostram as distribuições de campo elétrico e tensão para dois momentos distintos, exatamente antes e exatamente no final da descarga. Para a densidade de corrente são mostrados os resultados exatamente antes da DP e exatamente no início da DP, que é o instante que a cavidade possui corrente máxima durante o processo de descarga.

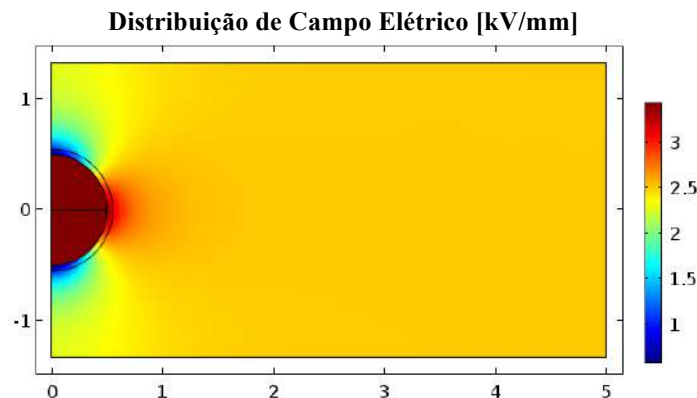


Figura 3-20: Modelo 1 - distribuição de campo elétrico exatamente antes da DP.

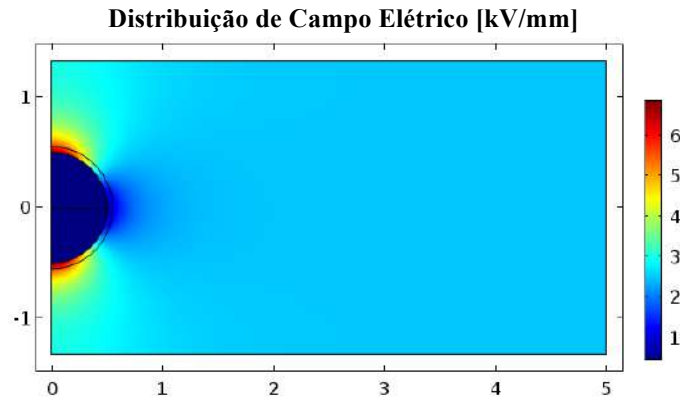


Figura 3-21: Modelo 1 - distribuição de campo elétrico exatamente no final da DP.

De acordo com a Figura 3-20 percebe-se que exatamente antes da DP o campo elétrico é maior na cavidade do que no isolante, visto que a permissividade relativa do ar é menor que a da mica. No entanto, exatamente após o término da DP, conforme mostrado pela Figura 3-21, o campo elétrico no centro da cavidade é inferior ao campo elétrico no isolante, visto que a cavidade comporta-se como condutor nesse instante. Os valores de campo elétrico exatamente antes e após a DP correspondem aos valores dos campos elétricos de ruptura e extinção, respectivamente. Uma vez que para este caso inicial não é considerado o atraso para início da DP, logo o campo elétrico exatamente antes do início da DP corresponde ao campo elétrico de ruptura. Vale ressaltar que no término da DP o campo elétrico na fronteira da cavidade é alto, tendo em vista o acúmulo de cargas na superfície da cavidade [4]. As mesmas observações podem ser também visualizadas nas distribuições axial e radial do campo elétrico nos instantes, antes e no final da descarga, conforme mostrado na Figura 3-22 e Figura 3-23, respectivamente.

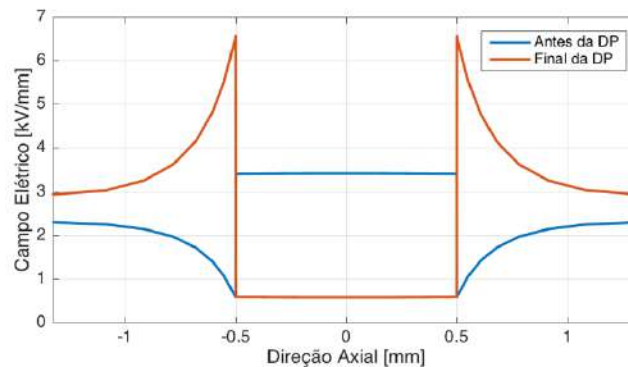


Figura 3-22: Modelo 1 - curvas de campo elétrico na direção axial.

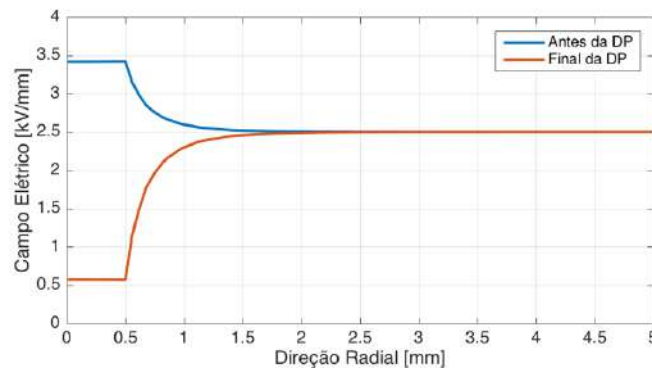


Figura 3-23: Modelo 1 - curvas de campo elétrico na direção radial.

Com relação à distribuição de tensão, de acordo com a Figura 3-24, percebe-se que antes da DP a cavidade fica submetida a um maior diferencial de tensão quando comparado com o diferencial de tensão no material isolante, tendo em vista o maior campo elétrico no ar que na mica. Adicionalmente conforme a curva de tensão ao longo da direção axial, mostrada na Figura 3-26, a tensão sobre a cavidade é de aproximadamente 3,4 kV antes da DP.

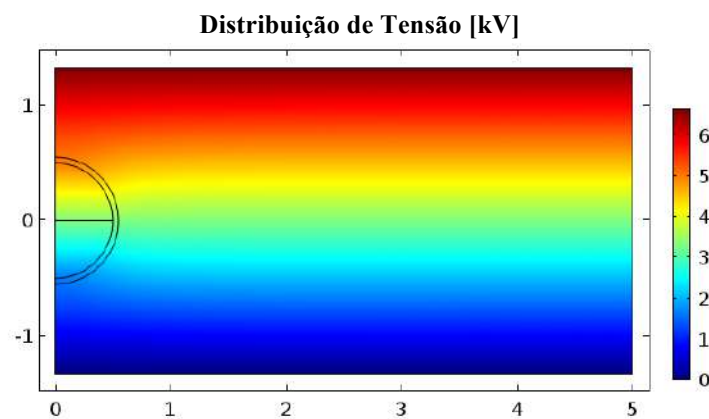


Figura 3-24: Modelo 1 - distribuição de tensão exatamente antes da DP.

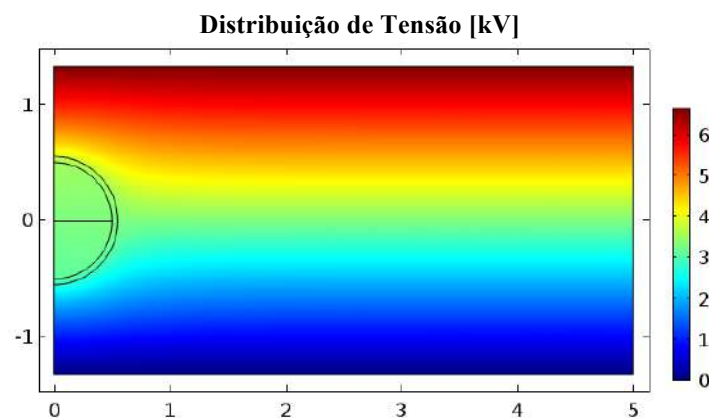


Figura 3-25: Modelo 1 - distribuição de tensão exatamente no final da DP.

Diferentemente da situação antes da descarga, exatamente no final da descarga, o diferencial de tensão na cavidade é menor que no material isolante, tendo em vista o fato de que a cavidade passa a se comportar como condutora, representando quase que um

curto-circuito em seu interior, tal como mostrado pela Figura 3-25. Além disso, no final da DP a tensão sobre a cavidade é de aproximadamente 0,585 kV, tal como apresentado na Figura 3-26.

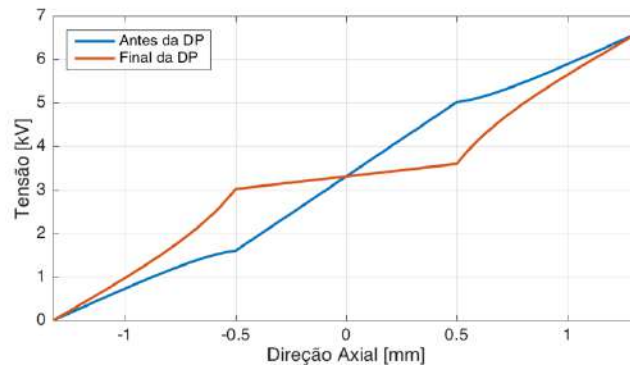


Figura 3-26: Modelo 1 - curvas de tensão na direção axial.

Para a densidade de corrente, são apresentados os resultados exatamente antes e exatamente no início da DP. Antes da DP não há corrente, uma vez que a condutividade da cavidade é ajustada como sendo zero, no entanto, no início da descarga, a densidade de corrente atinge seu valor máximo, em função da cavidade estar conduzindo e o campo elétrico possuir o seu maior valor durante o processo de DP. Na Figura 3-27 pode ser vista a densidade de corrente exatamente antes do início da DP, onde vale ressaltar que no material isolante a densidade é diferente de zero pois a condutividade da mica na simulação possui valor igual a $2,01 \cdot 10^{-15}$ S/m, não sendo exatamente nula.

Adicionalmente, na Figura 3-28 pode ser vista a densidade de corrente exatamente no início da DP, enquanto que na Figura 3-29 e Figura 3-30 são apresentadas as densidades de corrente exatamente antes e no início da DP nas direções axial e radial, respectivamente, em que percebe-se o valor máximo de aproximadamente 15 mA/mm^2 .

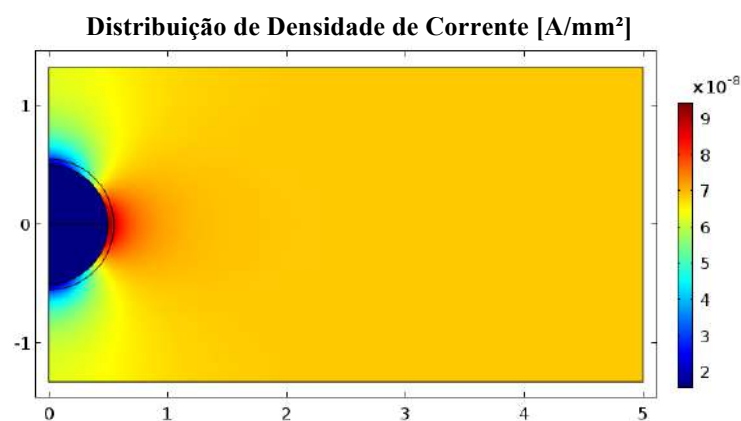


Figura 3-27: Modelo 1 - distribuição de densidade de corrente antes da DP.

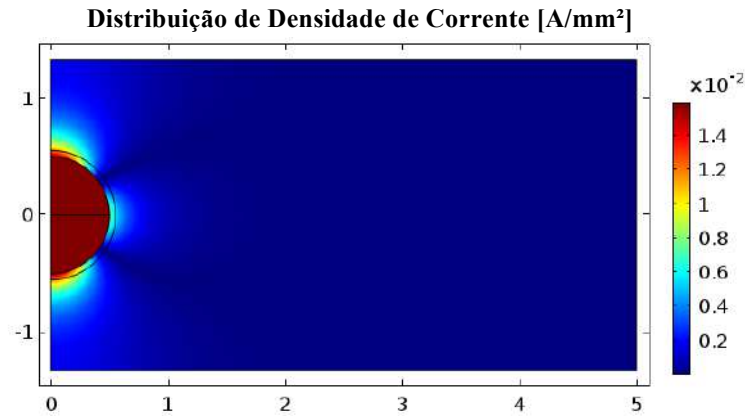


Figura 3-28: Modelo 1 - distribuição de densidade de corrente no início da DP.

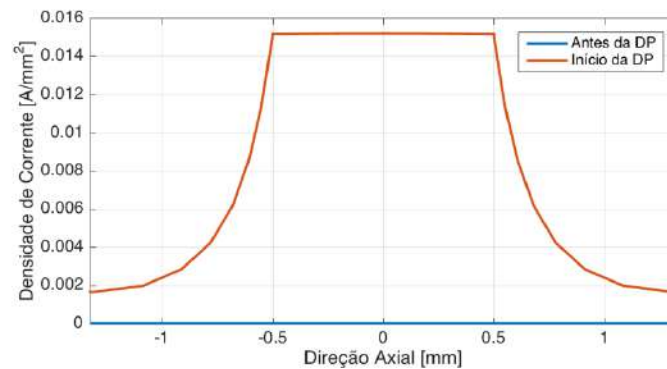


Figura 3-29: Modelo 1 - curvas de densidade de corrente na direção axial.

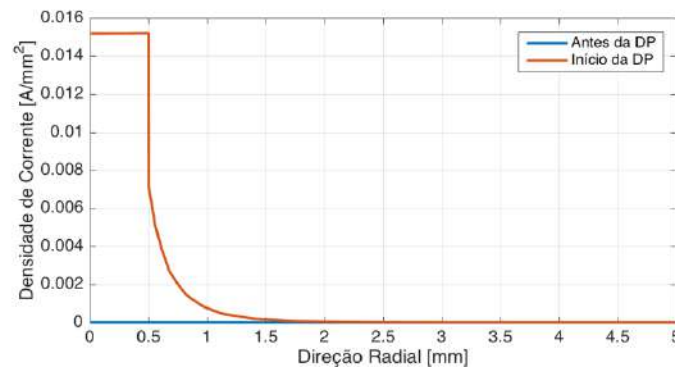


Figura 3-30: Modelo 1 - curvas de densidade de corrente na direção radial.

Além dos resultados já mostrados, as figuras subsequentes apresentam as formas de onda ampliadas, com o intuito de verificar o comportamento dinâmico das grandezas durante o processo da descarga, uma vez que o passo de integração nesse intervalo é de 1 ns, não sendo possível, portanto, perceber a dinâmica em uma figura de dois ciclos da tensão aplicada. Neste sentido, a Figura 3-31 mostra o campo elétrico no centro da cavidade durante o processo da DP, onde é possível perceber que sua dinâmica inicia-se no valor do campo de ruptura e decai para o valor do campo de extinção. Analogamente, na Figura 3-32, a corrente no início do processo de descarga possui valor máximo de 12 mA e cai com o decaimento do campo elétrico na cavidade.

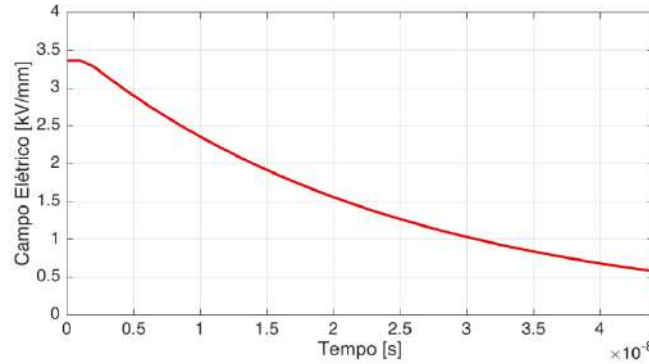


Figura 3-31: Modelo 1 - campo elétrico no centro da cavidade (zoom).

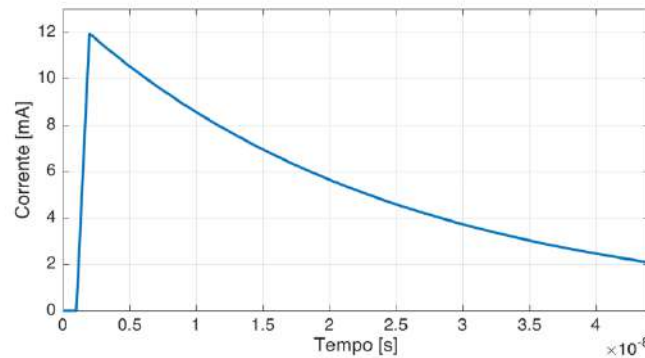


Figura 3-32: Modelo 1 - forma de onda de corrente na cavidade (zoom).

As formas de onda das cargas real e aparente ampliadas podem ser vistas na Figura 3-33. As cargas são obtidas via integração da corrente elétrica, logo no início do processo da DP, a amplitude das cargas é igual a zero e no fim do processo atingem seu valor máximo, que são aproximadamente 90 pC, para a carga aparente, e 245 pC, para a carga real.

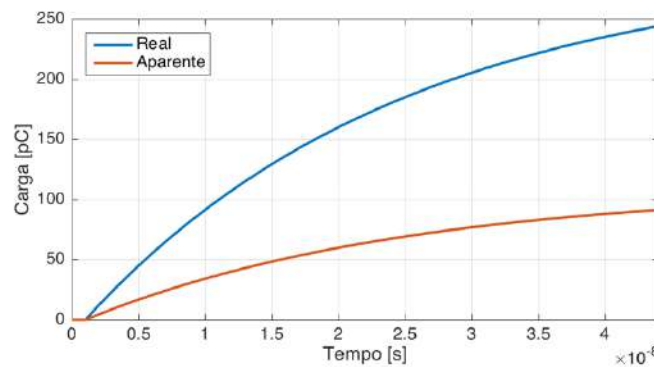


Figura 3-33: Modelo 1 - formas de onda de carga (zoom).

3.9.4 Modelo 2 - simulação considerando o atraso para início da descarga

Para este modelo são apresentados os resultados considerando o atraso para o início da DP, ou seja, é utilizada a taxa de geração de elétrons, tanto por emissão de

superfície quanto devido ao volume da cavidade. Para considerar o atraso são utilizadas as Equações (3-3) a (3-6), sendo que na Equação (3-5) a relação entre a temperatura ambiente e a temperatura da geometria é considerada como sendo unitária, uma vez que a variação na temperatura da cavidade devido à DP não é considerada neste modelo. A Figura 3-34 mostra as formas de onda de campo elétrico.

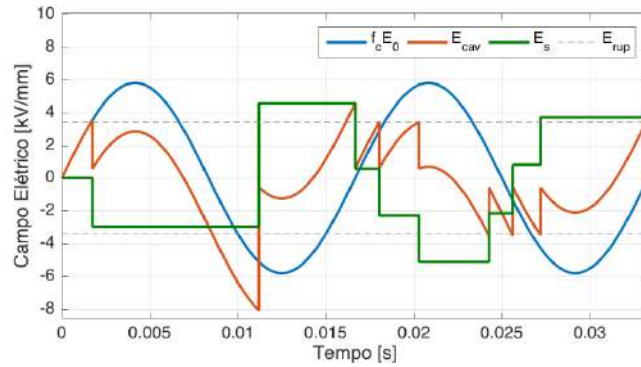


Figura 3-34: Modelo 2 - formas de onda de campo elétrico.

De acordo com a Figura 3-34, nota-se que quando o campo elétrico no centro da cavidade é maior que o campo elétrico de ruptura não necessariamente ocorre a DP, visto que a condição de existência de elétrons livres suficientes para iniciar o processo também deve ser satisfeita, diferentemente do caso anterior, que só considerava a condição do campo elétrico no centro da cavidade ser maior que o campo elétrico de ruptura. Isto faz com que haja, portanto, atraso para o início da descarga, no entanto, tal atraso leva a maiores valores de amplitude de descarga, uma vez que a DP ocorre em momentos em que o campo elétrico no centro da cavidade possui valores maiores. Tal fato é comprovado pela Figura 3-35, que mostra a forma de onda da corrente considerando o atraso para o início da DP. Além disso, é importante ressaltar que quando há mudança de sinal entre duas descargas, a taxa de emissão de elétrons devido à superfície da cavidade possui valor igual a N_{es0B} , que é menor que o valor utilizado para a situação em que não há alteração de sinal entre duas DPs, ou seja, quando a taxa de emissão de elétrons devido à superfície da cavidade é igual a N_{es0A} . Desta forma, quando a taxa de emissão de elétrons devido à superfície da cavidade é igual a N_{es0B} o atraso de ocorrência da DP tende a ser maior, conforme pode ser observado nos resultados obtidos por meio da comparação entre os valores de pico atingidos pelo campo elétrico e pela corrente na cavidade.

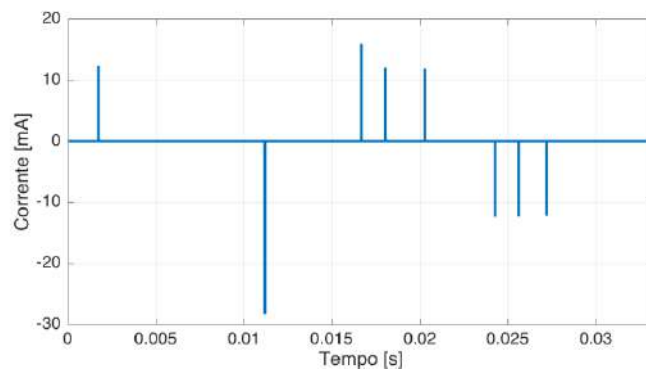


Figura 3-35: Modelo 2 - forma de onda da corrente na cavidade.

Como consequência dos diferentes valores das amplitudes de corrente para cada descarga, as amplitudes das cargas, real e aparente, também são diferentes para cada DP, tal como pode ser visto na Figura 3-36.

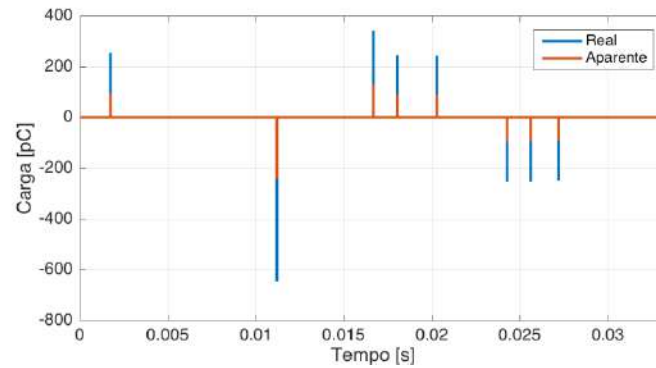


Figura 3-36: Modelo 2 - forma de onda de carga das DPs.

3.9.5 Modelo 3 - simulação considerando o decaimento de cargas de superfície

Continuando na evolução do modelo, neste modelo são apresentados os resultados considerando o decaimento de cargas da superfície da cavidade. Conforme apresentado anteriormente após a ocorrência da DP surgem cargas que se acumulam na superfície da cavidade gerando o campo elétrico E_s , no entanto, o número de cargas presentes na superfície da cavidade pode reduzir antes que ocorra a próxima descarga, ocasionando uma redução na intensidade de E_s . Para modelar este decaimento de cargas na superfície da cavidade, a condutividade na região entre a cavidade e o material isolante, denominada superfície da cavidade, é aumentada de σ_{sup0} para σ_{supmax} , levando a uma consequente redução na taxa de variação do campo elétrico no centro da cavidade, reduzindo assim a intensidade do campo elétrico devido às cargas de superfície.

A Figura 3-37 mostra as formas de onda de campo elétrico obtidas para a condutividade máxima da superfície da cavidade (σ_{supmax}) igual a $3,57 \cdot 10^{-9}$ S/m, que é o valor utilizado para o caso base.

Conforme pode ser verificado na Figura 3-37 quando E_{cav} possui o sinal contrário de E_s , indicando que os dois campos estão em sentidos contrários, a condutividade da superfície da cavidade possui valor inicial igual a $2,01 \cdot 10^{-15}$ S/m, ou seja, a própria condutividade do material isolante. No entanto, quando o campo elétrico no centro da cavidade possui o mesmo sentido do campo elétrico devido às cargas de superfície, a condutividade da superfície da cavidade é aumentada para σ_{supmax} , e ocorre, portanto, o decaimento de E_s . Vale ressaltar que além de E_{cav} e E_s possuírem o mesmo sentido, é necessário que hajam elétrons livres na superfície da cavidade para que haja decaimento, isto é, a condição $E_s > E_{spresa}$ também deve ser atendida.

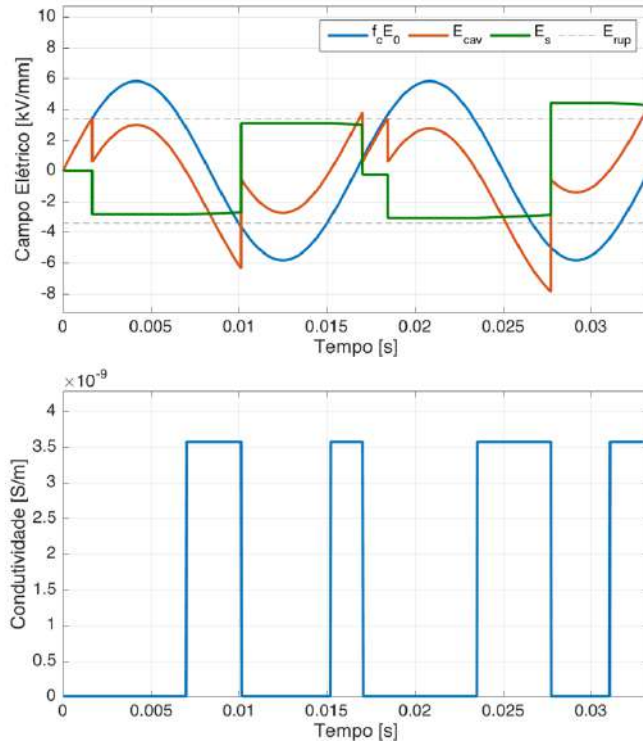


Figura 3-37: Modelo 3 - formas de onda de campo elétrico e condutividade.

Na Figura 3-38 é mostrada a forma do campo elétrico E_s ampliada antes da ocorrência da segunda DP, e a redução de E_s é mais evidente.

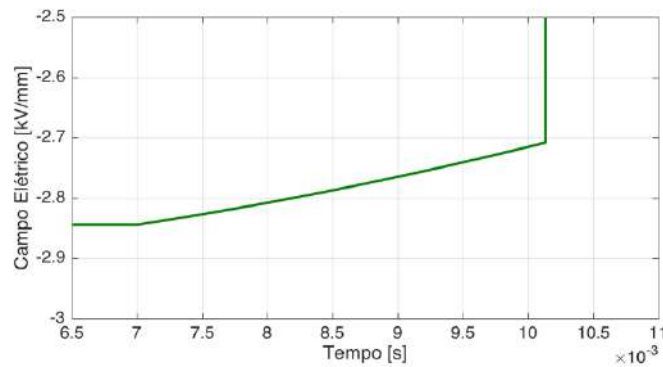


Figura 3-38: Modelo 3.1 - campo elétrico devido às cargas de superfície (zoom).

Com o intuito de verificar a influência da condutividade da superfície, foram feitas simulações para diferentes valores de σ_{supmax} . Os valores utilizados foram $6 \cdot 10^{-9}$ S/m para o modelo 3.2 e $10 \cdot 10^{-9}$ S/m para o modelo 3.3, e as formas de onda de campo elétrico e condutividade da superfície da cavidade são mostradas em sequência.

Com base nos resultados mostrados na Figura 3-39 e na Figura 3-40 é possível notar que à medida que se aumenta a condutividade máxima da superfície da cavidade maior é o decaimento do campo elétrico devido às cargas de superfície.

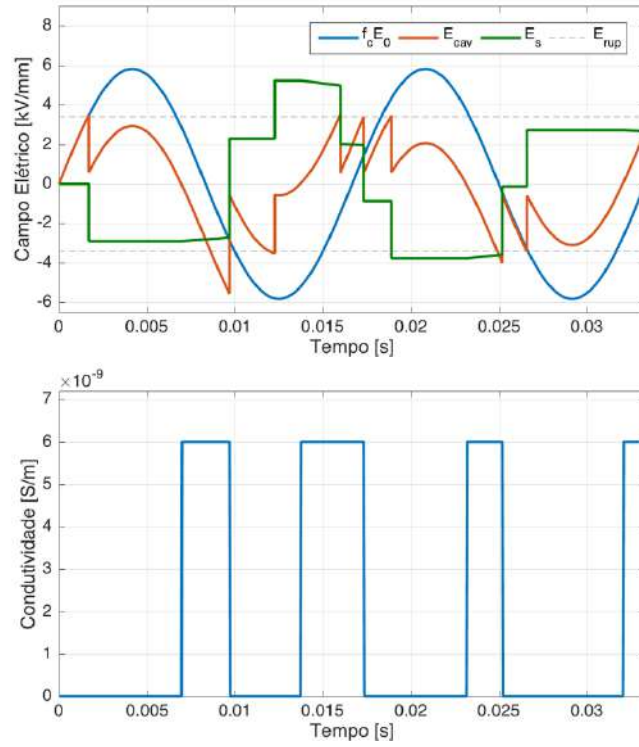


Figura 3-39: Modelo 3.2 - formas de onda de campo elétrico e condutividade.

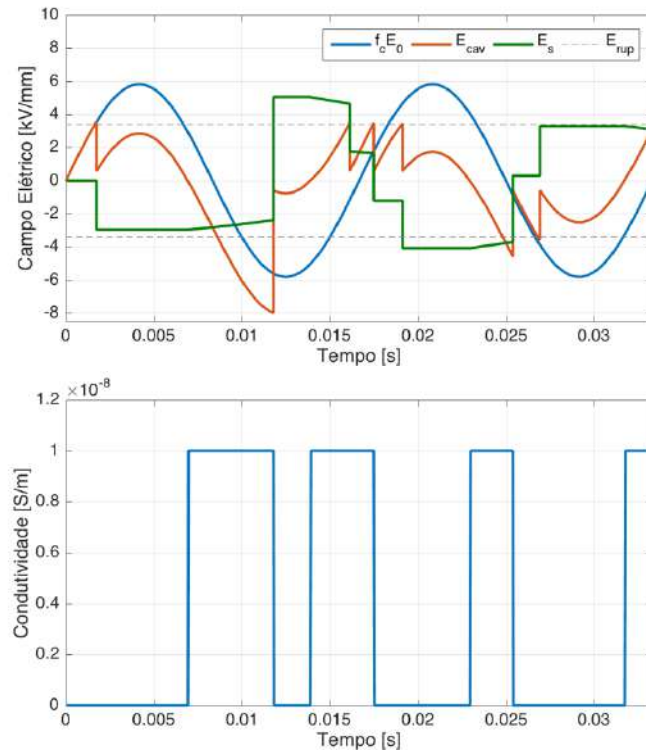


Figura 3-40: Modelo 3.3 - formas de onda de campo elétrico e condutividade.

Analogamente, nas figuras a seguir são apresentadas as formas de onda de corrente para os três valores de condutividade da superfície máxima.

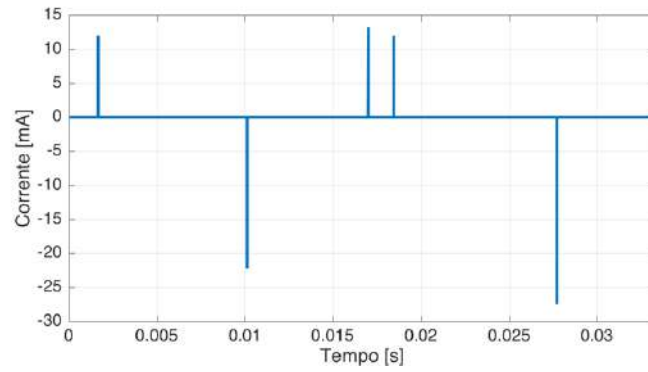


Figura 3-41: Modelo 3.1 - forma de onda da corrente na cavidade.

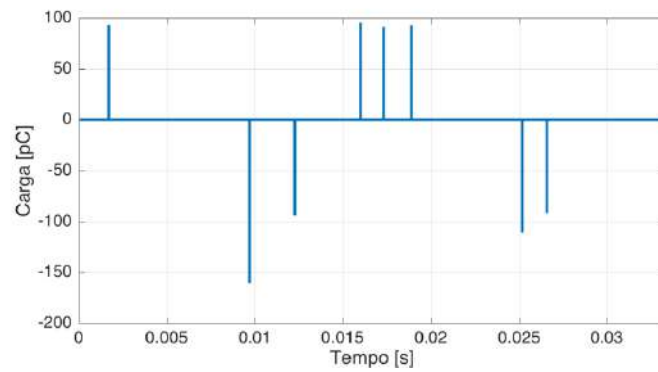


Figura 3-42: Modelo 3.2 - forma de onda da corrente na cavidade.

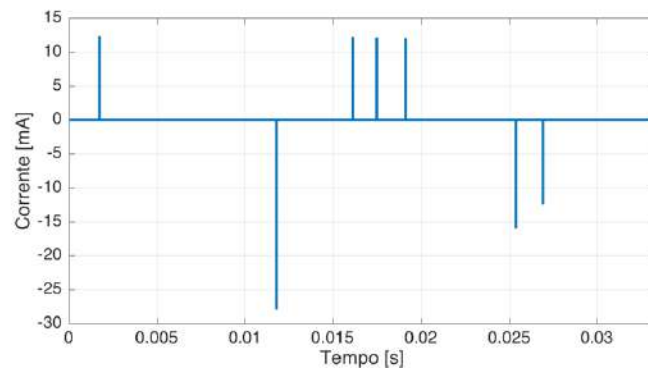


Figura 3-43: Modelo 3.3 - forma de onda da corrente na cavidade.

Com relação às cargas real e aparente, as figuras a seguir mostram os resultados obtidos para todos os valores de condutividade da superfície máxima simulados.

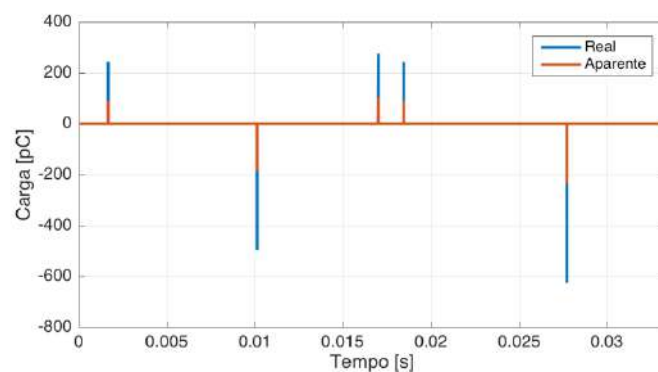


Figura 3-44: Modelo 3.1 - forma de onda de carga das DPs.

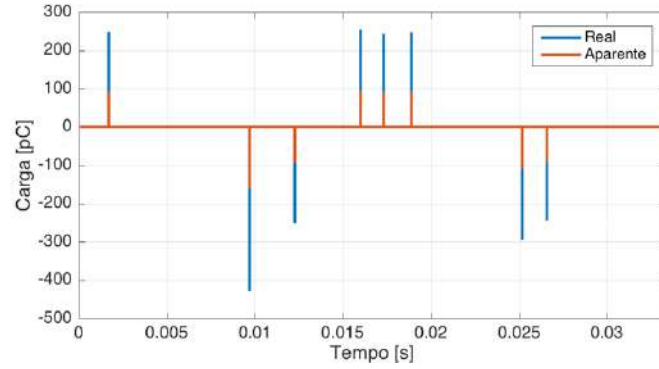


Figura 3-45: Modelo 3.2 - forma de onda de carga das DPs.

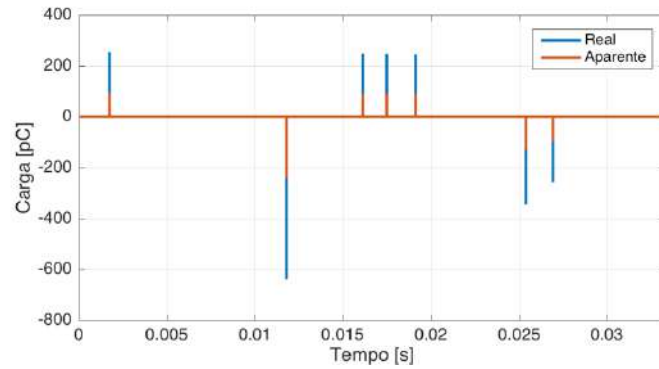


Figura 3-46: Modelo 3.3 - forma de onda de carga das DPs.

De acordo com as figuras anteriores obtidas para as formas de onda de carga e corrente, verifica-se similaridade nos resultados, valendo ressaltar diferenças nos valores de pico e número de descargas que podem se dar não necessariamente pela condutividade da superfície da cavidade, mas também pelo caráter estatístico da DP ocasionado pela probabilidade de ocorrência da DP.

O valor de $\sigma_{supmax} = 3,57 \cdot 10^{-9}$ S/m foi escolhido para o caso base, logo, a seguir são apresentados os resultados para 60 ciclos da tensão aplicada, ou seja, 1 s.

A Figura 3-47 mostra as formas de onda de campo elétrico, enquanto que a Figura 3-48 mostra as formas de onda de carga aparente, para os seis primeiros ciclos da tensão aplicada.

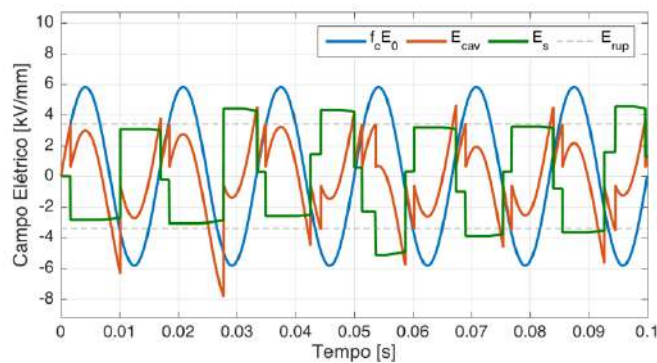


Figura 3-47: Modelo 3 - formas de onda de campo elétrico.

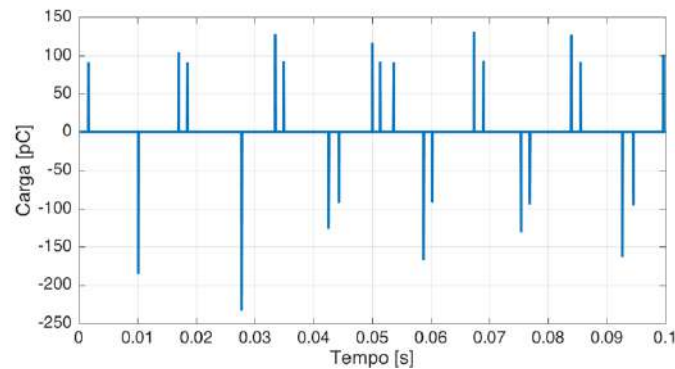


Figura 3-48: Modelo 3 - forma de onda de carga aparente das DP's.

Finalmente, como um dos resultados que podem ser utilizados na prática acerca do acompanhamento da condição do isolamento, a Figura 3-49 apresenta a taxa de repetição de descargas em função da amplitude da carga aparente e da fase de ocorrência da DP (gráfico φ - q - n ou PRPPPA).

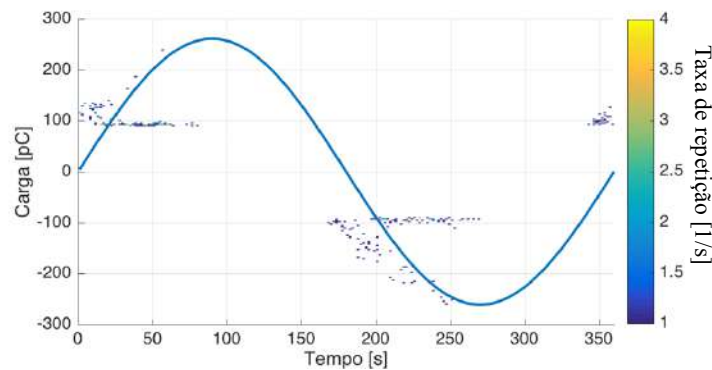


Figura 3-49: Modelo 3 - gráfico φ - q - n .

Além disso, são apresentados os parâmetros gerais dos resultados obtidos, os quais podem ser vistos na Tabela 3-3.

Tabela 3-3: Modelo 3 - resultados gerais.

Resultado	Valor
Número médio de DP's por ciclo	4,2
Carga aparente total média por ciclo [pC]	468,0
Carga aparente média por DP [pC]	111,9
Intensidade da carga aparente máxima [pC]	261,1
Intensidade da carga aparente mínima [pC]	90,8

Os parâmetros apresentados na Tabela 3-3 são importantes para comparar os resultados entre os diferentes tipos de simulações realizados. A magnitude da descarga está relacionada com a extensão dos danos que podem ser causados devido às DP's [5]. O número de descargas por sua vez está ligado com a taxa de repetição de descargas e indica o quanto está de fato ocorrendo de descargas parciais no isolamento. A magnitude e a taxa de repetição de descargas ajudam a determinar a condição do isolamento [5].

De acordo com os resultados obtidos para todos os modelos de simulação apresentados para o isolante cilíndrico com uma cavidade esférica em seu interior, é possível perceber a evolução da modelagem e entender melhor o fenômeno de descargas parciais. Adicionalmente, os resultados obtidos estão coerentes com [4] e, portanto, a modelagem está adequada para ser usada no estudo de descargas parciais em isolamento de máquinas elétricas. As adequações necessárias são mostradas no capítulo seguinte.

Capítulo 4

4 APLICAÇÃO DO MODELO EM UMA BOBINA

De posse do modelo implementado no Capítulo 3, neste capítulo teve-se por interesse aplicá-lo ao estudo de descargas parciais no isolamento de uma bobina estatórica de uma máquina elétrica de tensão nominal igual a 13,8 kV. A fim de entender melhor o fenômeno em máquinas elétricas, foram feitas simulações verificando a influência de alguns parâmetros, como, por exemplo, raio, posição e geometria da cavidade, amplitude da tensão aplicada, espessura da isolação principal e, finalmente, temperatura da geometria.

Uma vez que não foram encontradas grandes diferenças nos resultados para a geometria cilíndrica considerando ou não a elevação de temperatura devido à descarga em [4], nas simulações deste capítulo não foi considerada tal elevação de temperatura, tendo em vista que a simulação da geometria 3D somada à simulação multifísica levariam a tempos de simulação inviáveis para obter os resultados para todos os casos simulados nesta dissertação. Neste sentido, no caso em que foram feitas simulações considerando a alteração da temperatura inicial da geometria, apenas os parâmetros variáveis foram modificados e a temperatura na geometria foi mantida constante durante a simulação.

A Figura 4-1 mostra o esquema de uma seção transversal da bobina pré-formada de uma máquina elétrica com uma cavidade em sua isolação principal.

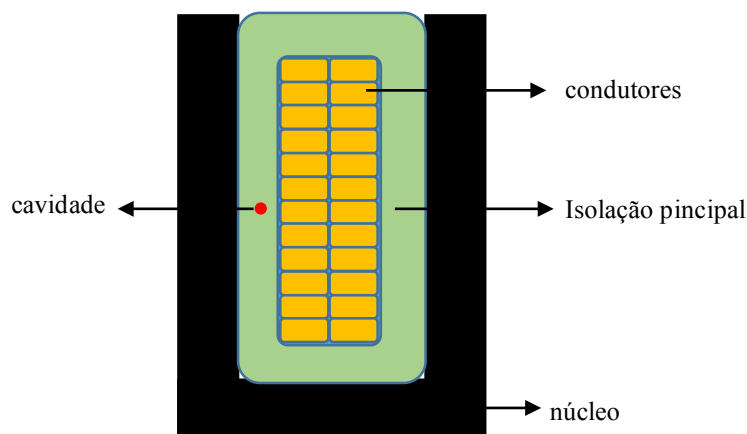


Figura 4-1: Esquema da bobina pré-formada de uma máquina [11].

O intuito é estudar o fenômeno de descargas parciais devido a cavidades na isolação principal da bobina. Desta forma, na geometria utilizada não foram modeladas as isolações do condutor e entre espiras e, além disso, foi considerado que a tensão aplicada na bobina é igual em todos os condutores. A Figura 4-2, mostra um esquema da bobina sem cavidade, em que podem ser vistos os condutores, a isolação principal, a região de aplicação de tensão e a região aterrada da bobina.

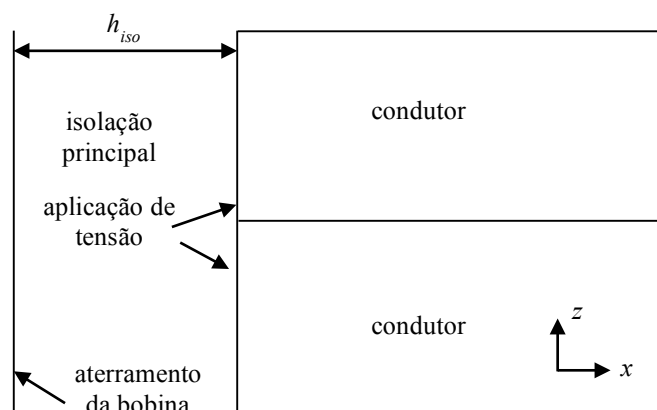


Figura 4-2: Esquema 2D para simulação da bobina.

Para as simulações foram utilizados os dados para a bobina apresentados na Tabela 4-1.

Tabela 4-1: Dados da bobina utilizada.

Parâmetro	Valor
número de espiras da bobina	7
número de condutores por espira	6
largura do condutor [mm]	5,6
altura do condutor [mm]	2

Com relação à isolamento principal da bobina foi utilizado como valor base 2,65 mm que corresponde, para uma tensão de 13,8 kV entre fases, a um campo elétrico de aproximadamente 3 kV/mm eficaz na isolamento principal sem cavidade, que, de acordo com [3], é um valor usual para isolamento de máquinas.

Uma vez que não há simetria cilíndrica na bobina, é necessário utilizar a modelagem 3D no *software* de elementos finitos, o que demanda mais tempo de simulação. A Figura 4-3 mostra o esquema da bobina modelada no *software* de elementos finitos.

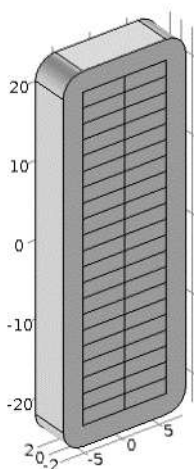


Figura 4-3: Esquema 3D da bobina modelada.

É importante ressaltar que foi considerada apenas uma cavidade no isolamento e o comprimento da bobina (profundidade) escolhido foi de 5 mm, uma vez que com este valor observou-se que o campo elétrico é uniforme nas fronteiras do eixo y (eixo relacionado à profundidade da bobina) para a cavidade de maior raio simulado neste trabalho, como pode ser visto na Figura 4-4. O valor do comprimento da bobina influi consideravelmente no tempo de simulação, visto que altera o número de elementos da malha gerada pelo *software* de elementos finitos.

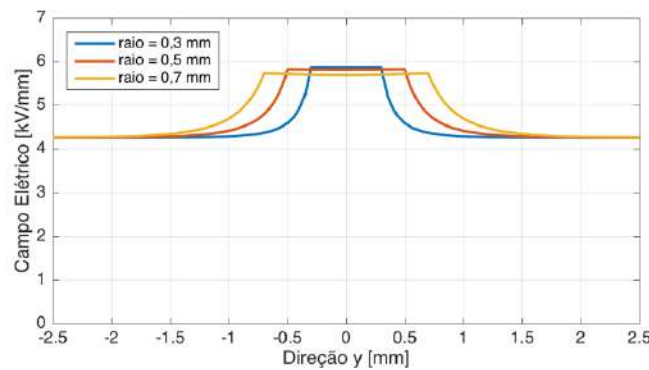


Figura 4-4: Campo elétrico na direção y.

Além disso, tendo em vista os altos tempos de simulação envolvidos com o uso de geometria 3D e a quantidade de casos simulados, neste capítulo não se obteve os gráficos φ - q - n , uma vez que seria necessário simular vários ciclos da tensão aplicada. Desta forma, em todos os casos são obtidos os resultados gerais para 10 ciclos da tensão aplicada.

4.1 Bobina sem Cavidade

Inicialmente são apresentados os resultados para a bobina sem cavidade. Na Figura 4-5 são mostradas a malha e as distribuições 3D de tensão e campo elétrico, no instante em que a tensão aplicada na bobina possui seu valor de pico.

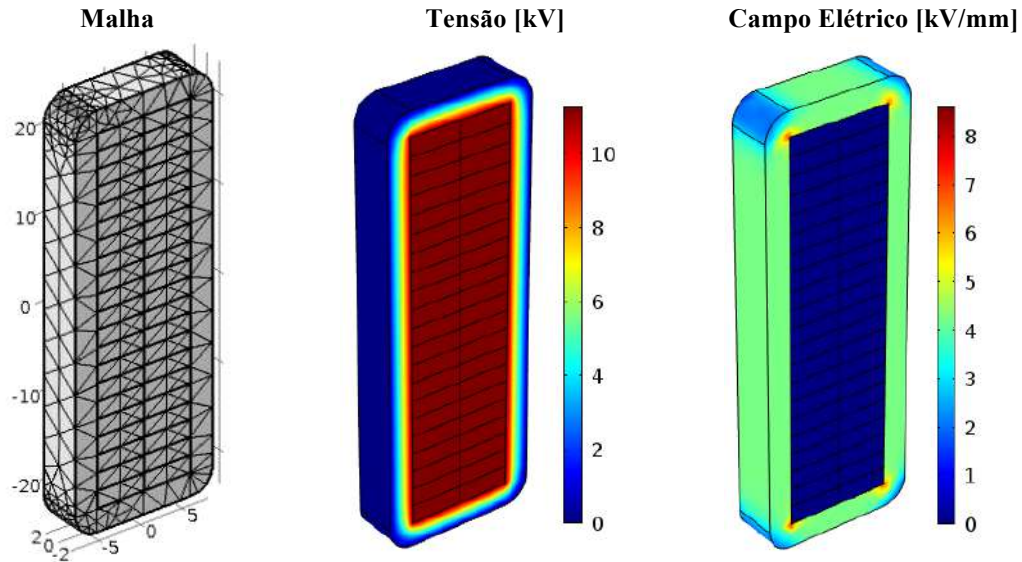


Figura 4-5: Bobina sem cavidade - malha e distribuições 3D.

Na Figura 4-6 é mostrada a variação do campo elétrico no centro da isolamento principal para um ciclo da tensão aplicada. O campo elétrico, tal como a tensão aplicada, é senoidal, conforme esperado.

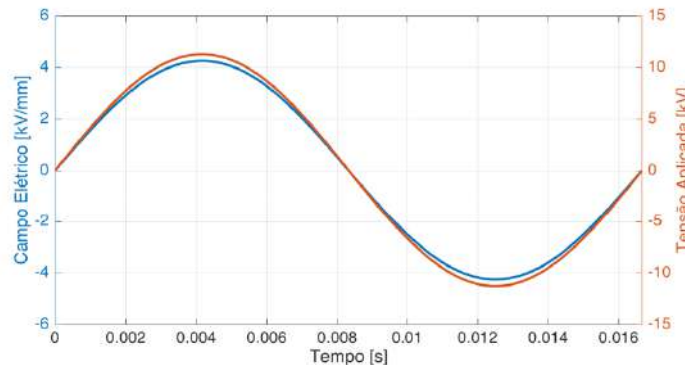


Figura 4-6: Campo elétrico no centro do isolamento e tensão aplicada.

O campo elétrico de pico é obtido no instante em que a tensão aplicada possui valor máximo, cujo valor é de aproximadamente 4,25 kV/mm, que corresponde a 3 kV/mm eficaz, tal como esperado para a espessura do isolamento utilizado, e de acordo com o valor obtido para a geometria cilíndrica.

A fim de melhor observar os resultados são apresentadas as distribuições das grandezas de interesse no plano xz que passa pelo centro da geometria, o qual está destacado na geometria da bobina conforme Figura 4-7.

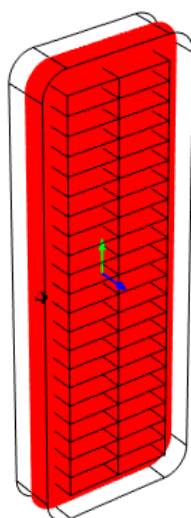


Figura 4-7: Plano xz que passa pelo centro da bobina..

Na Figura 4-8 são apresentados a tensão e o campo elétrico no referido plano xz.

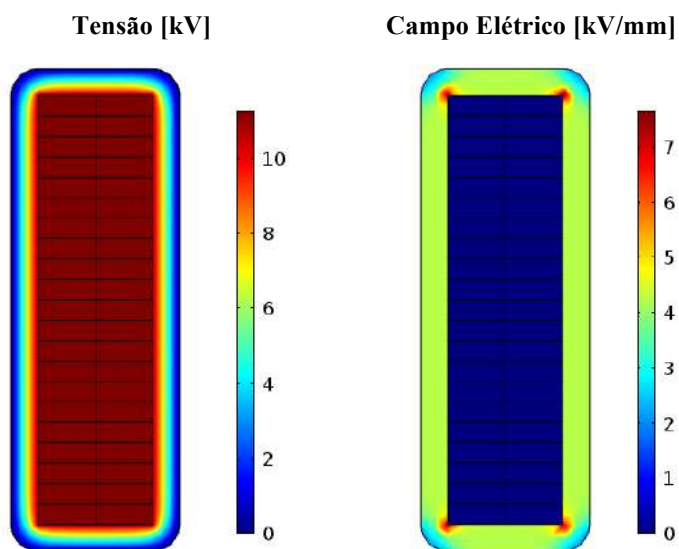


Figura 4-8: Bobina sem cavidade - distribuição de campo elétrico e tensão (2D).

A Figura 4-9 mostra as distribuições ampliadas de tensão e campo elétrico no isolamento.

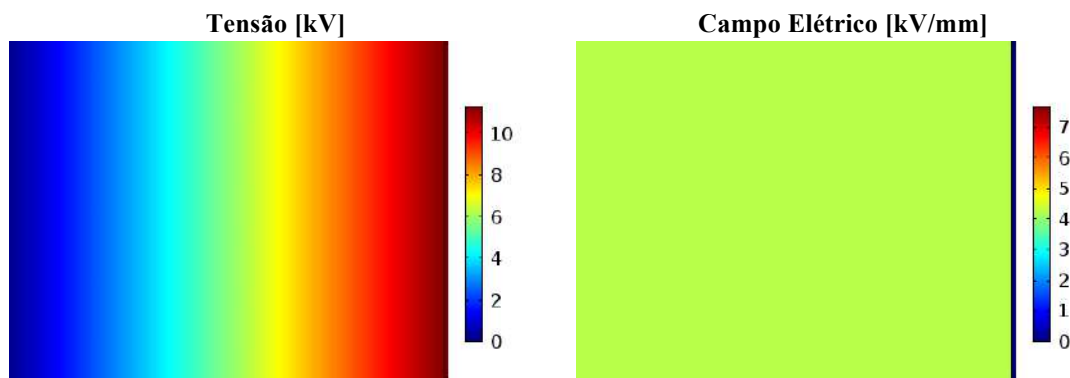


Figura 4-9: Bobina sem cavidade - distribuição de campo elétrico e tensão (Zoom).

Considerando ainda o instante em que a tensão aplicada possui valor máximo, a Figura 4-10 mostra o campo na direção x , onde percebe-se que sua intensidade é constante em todo o isolamento.

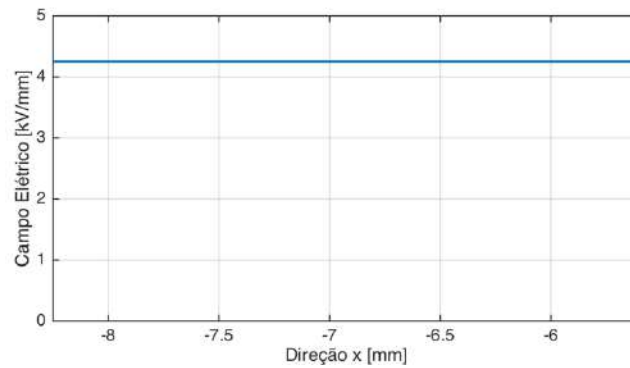


Figura 4-10: Bobina sem cavidade - campo elétrico na direção x .

Com relação à tensão, a

Figura 4-11 mostra a distribuição de tensão na direção x . Logo, percebe-se que o isolamento fica submetido a um mesmo diferencial de tensão.

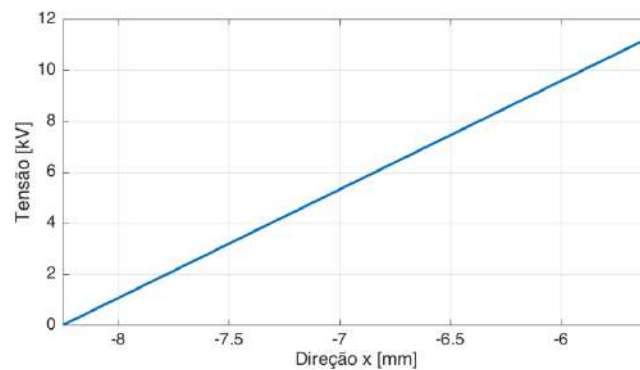


Figura 4-11: Bobina sem cavidade - tensão na direção x .

4.2 Bobina com Cavidade Esférica

A fim de comparar os resultados nas várias simulações realizadas, inicialmente é considerado um caso base, que é constituído por uma cavidade esférica com raio de 0,5 mm e espessura do isolamento de 2,65 mm de espessura. Os parâmetros de simulação para o caso base são os mesmos utilizados para a geometria cilíndrica, os quais podem ser visualizados na Tabela 3-1 e na Tabela 3-2.

A Figura 4-12 mostra o esquema 2D para o caso base da bobina com uma cavidade esférica.

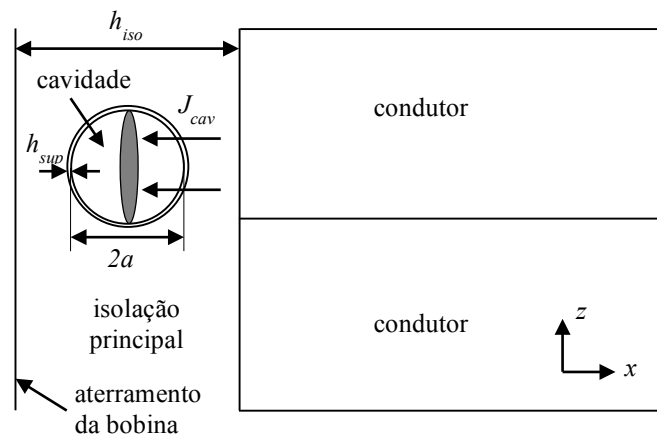


Figura 4-12: Esquema 2D para simulação da bobina..

Conforme pode ser visto na Figura 4-12, a geometria é composta por condutores, cavidade e isolamento principal. No caso base a cavidade com $raio = a = 0,5$ mm é posicionada no centro da isolação principal. O valor de espessura da superfície da cavidade (h_{sup}) escolhido foi o mesmo utilizado na geometria cilíndrica, ou seja, 0,05 mm. As correntes na cavidade e na superfície de aterramento da bobina são obtidas por meio da integração das densidades de corrente na área de seção transversal da cavidade, mostrada pela região destacada na Figura 4-12, e na superfície de aterramento da bobina, respectivamente. Consequentemente, as cargas real e aparente são obtidas por meio da integração no tempo da corrente que flui na cavidade e na superfície aterrada da bobina, respectivamente, tal como feito na geometria cilíndrica.

A Figura 4-13 mostra a geometria e a malha gerada.

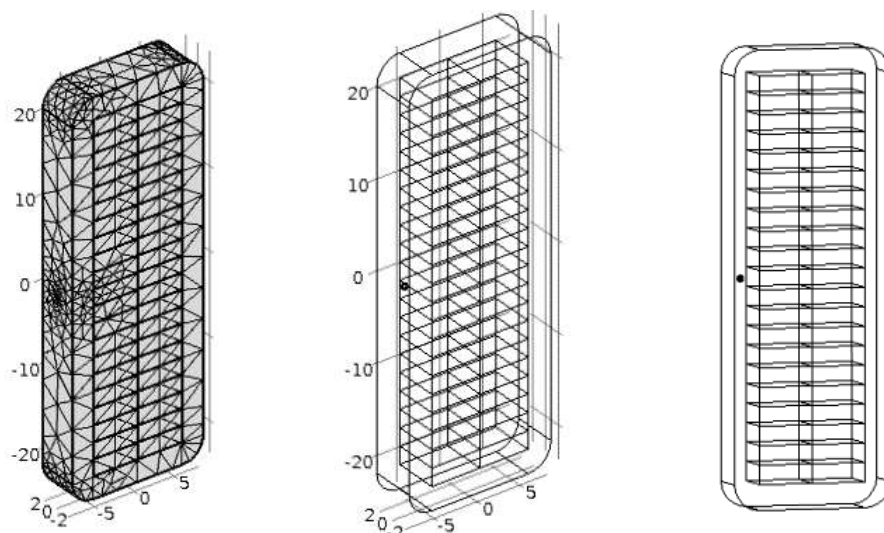


Figura 4-13: Caso base - geometria e malha.

Nota-se, portanto, o aumento no número de elementos na malha gerada com relação à geometria sem cavidade, tal como obtido para o isolante cilíndrico. Vale ressaltar que, uma vez que a geometria utilizada para a ranhura é 3D este aumento ocorre nos três eixos, o que resulta em maior tempo de simulação. Neste sentido, deve haver um compromisso entre tempo de simulação e refinamento da malha a ser utilizada, uma vez que elementos de malha grandes podem levar a resultados incorretos, no entanto, elementos muito pequenos podem levar a tempos de simulação impraticáveis sem maiores benefícios de precisão.

Quando há cavidade no isolante, o campo elétrico é maior na cavidade comparado ao restante do isolamento, conforme já explanado. Na Figura 4-14 é mostrada a variação do campo elétrico no centro da cavidade para um ciclo da tensão aplicada. Conforme pode ser notado, o campo elétrico é maior que no caso sem cavidade mostrado na Figura 4-6.

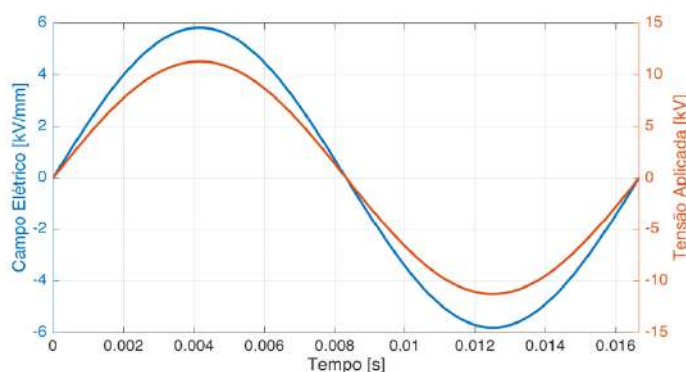


Figura 4-14: Caso base - campo elétrico no centro do isolamento e tensão aplicada.

Adicionalmente, o campo elétrico no centro da cavidade atinge valores maiores que o campo elétrico de ruptura utilizado para a simulação (3,4 kV/mm para o caso base), havendo, portanto, a possibilidade de ocorrência da DP. Neste sentido, a partir de agora são apresentados os resultados para a simulação da ocorrência de descargas parciais. A Figura 4-15 mostra as formas de onda de campo elétrico para 2 ciclos da tensão aplicada.

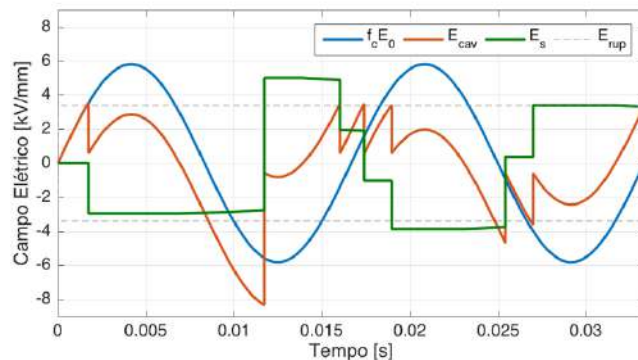


Figura 4-15: Formas de onda de campo elétrico.

Na Figura 4-16 é apresentada a forma de onda de corrente na cavidade devido à ocorrência de descargas.

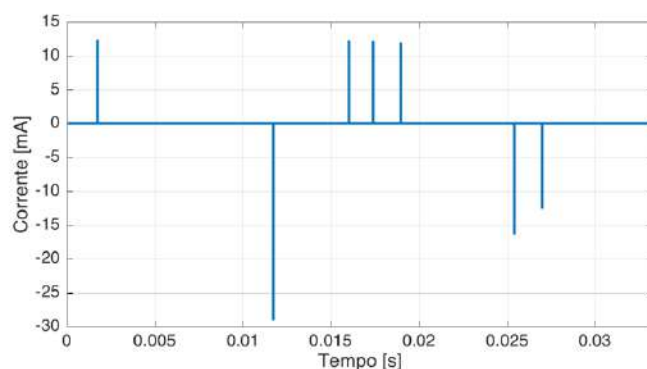


Figura 4-16: Forma de onda da corrente na cavidade.

De acordo com a Figura 4-16 nota-se a ocorrência de sete descargas parciais durante os dois ciclos da tensão aplicada. O modelo levou em conta a taxa de geração de elétrons e o decaimento de cargas na superfície da cavidade. De posse dos valores de corrente na área da seção da cavidade que passa pelo seu centro e na superfície de aterramento da bobina, pode-se obter as cargas real e aparente, respectivamente, as quais podem ser visualizadas na Figura 4-17.

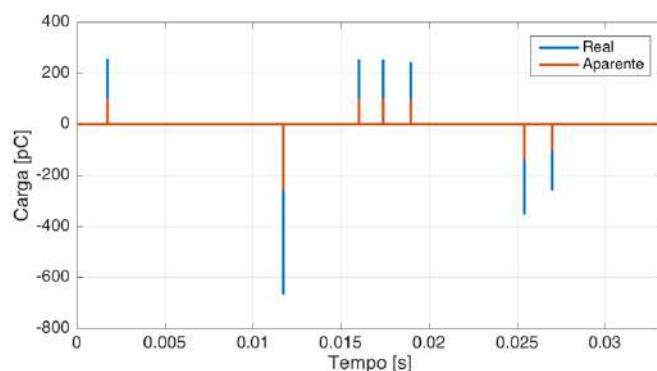


Figura 4-17: Formas de onda de carga das DPs.

De acordo com a Figura 4-17, nota-se que as cargas possuem amplitude na ordem de pC e a carga aparente é menor que a real, tal como esperado e também observado na geometria 2D com simetria cilíndrica.

Conforme apresentado para a geometria cilíndrica, a fim de verificar a influência da descarga parcial na distribuição das grandezas de interesse na geometria, as figuras seguintes mostram as distribuições de campo elétrico e tensão para dois momentos distintos, exatamente antes e exatamente no final da descarga. Para a densidade de corrente, mais uma vez, são mostrados os resultados exatamente antes da DP e exatamente no início da DP, que é o instante que a cavidade possui corrente máxima durante o processo de descarga. São apresentadas as figuras 2D no plano xz que passa pelo pelo centro da bobina, que coincide também com o centro da cavidade. São apresentadas as distribuições em todo o plano da bobina e também em figuras ampliadas na região da cavidade. Além disso, no modelo é também possível obter curvas com a intensidade da grandeza em uma determinada direção e, portanto, são apresentadas curvas nas direções x e z próximas da região da cavidade. A Figura 4-18 e a Figura 4-19 mostram a distribuição de campo elétrico.

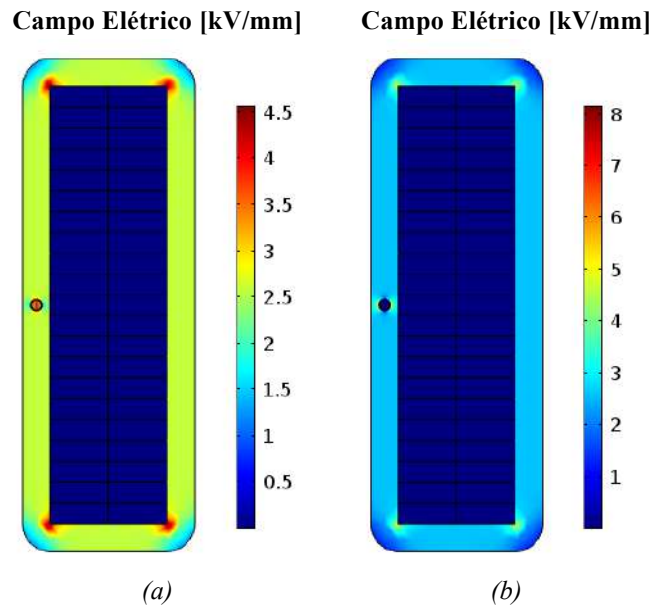


Figura 4-18: Distribuição de campo elétrico - (a) antes da DP; (b) final da DP.

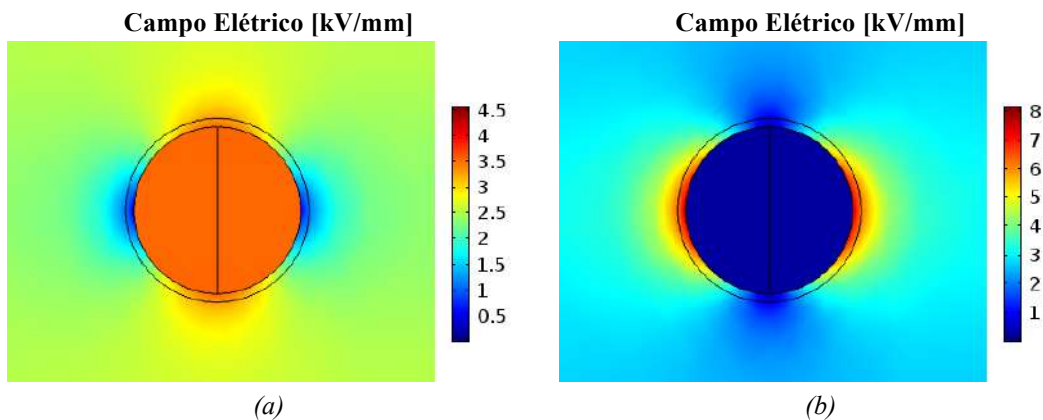


Figura 4-19: Distribuição de campo elétrico antes e no final da DP (Zoom).

De acordo com a Figura 4-18 e com a Figura 4-19 percebe-se que exatamente antes da DP o campo elétrico é maior na cavidade do que no isolante, visto que a

permissividade do ar é menor que a da mica, tal como verificado na geometria cilíndrica. Além disso, o campo elétrico na cavidade é maior que o campo elétrico de ruptura, que é uma das condições necessárias para a ocorrência da descarga parcial. Contudo, exatamente após o término da DP, o campo elétrico no centro da cavidade é inferior ao campo elétrico no isolante e aproximadamente igual ao campo elétrico de extinção, visto que a cavidade se comporta como condutor durante todo o processo da DP.

Tal como observado para a geometria cilíndrica, no término da DP o campo elétrico na fronteira da cavidade é alto, tendo em vista o acúmulo de cargas na superfície da cavidade [4]. As mesmas observações podem ser também visualizadas nas distribuições de campo elétrico nas direções x e z, nos instantes, exatamente antes e exatamente no final da descarga, conforme mostrado na Figura 4-20 e na Figura 4-21, respectivamente.

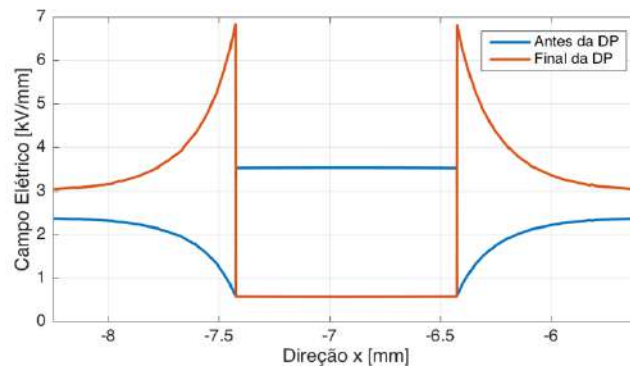


Figura 4-20: Curvas de campo elétrico na direção x.

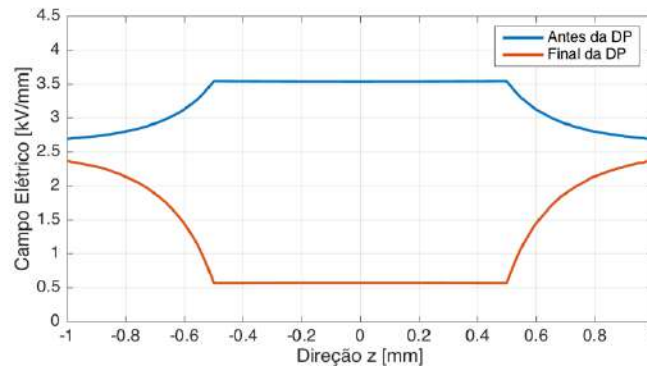


Figura 4-21: Curvas de campo elétrico na direção z.

A Figura 4-22 e a Figura 4-23 mostram a distribuição de tensão.

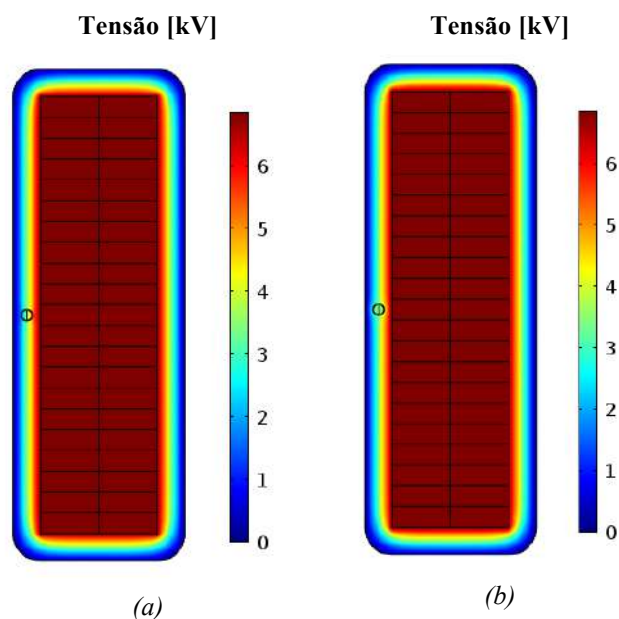


Figura 4-22: Distribuição de tensão - (a) antes da DP; (b) final da DP.

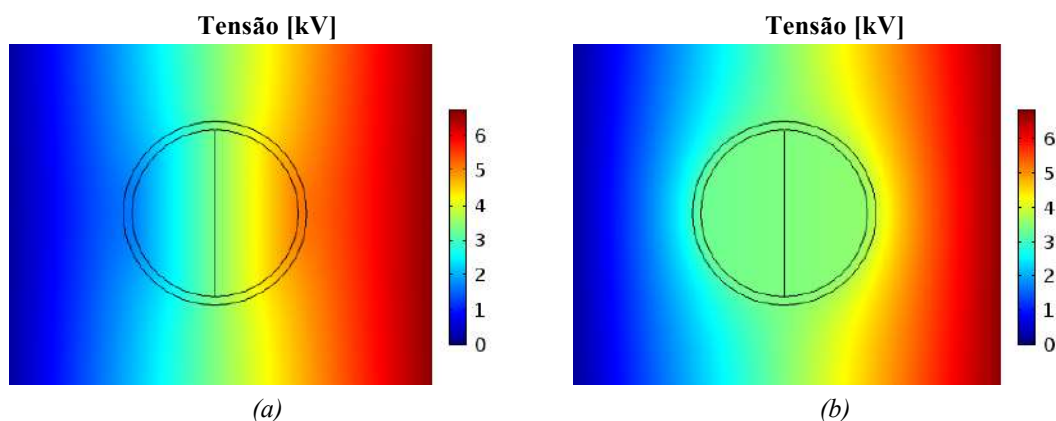


Figura 4-23: Distribuição de tensão (Zoom) - (a) antes da DP; (b) final da DP.

Para a distribuição de tensão, de acordo com a Figura 4-22 e com a Figura 4-23, percebe-se que antes da DP a cavidade fica submetida a um maior diferencial de tensão quando comparado com o diferencial de tensão no material isolante, tendo em vista que o campo elétrico no ar é maior que na mica.

Ainda, de acordo com a Figura 4-22 e com a Figura 4-23, conforme também verificado para a geometria cilíndrica, no final da descarga a variação de tensão na cavidade é menor que no material isolante, tendo em vista o fato de que a condutividade da cavidade é aumentada durante a DP. As mesmas observações podem ser verificadas também na Figura 4-24.

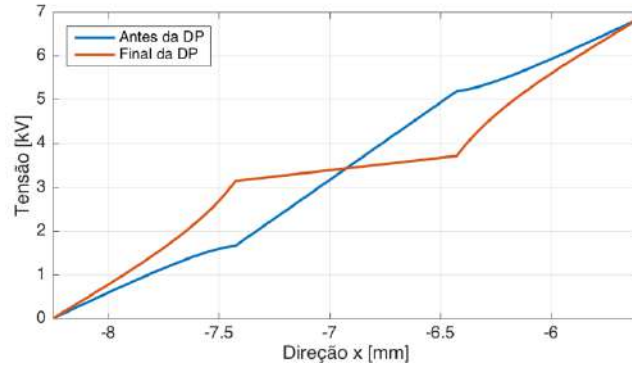


Figura 4-24: Curvas de tensão na direção x.

Do mesmo modo que feito para a geometria cilíndrica, a distribuição de densidade de corrente, é apresentada antes e no início da descarga, cujos resultados podem ser vistos na Figura 4-25. Antes da DP não há corrente, uma vez que a condutividade da cavidade é zero. Todavia, no início da descarga, a densidade de corrente atinge seu valor máximo, pois é o momento em que o campo elétrico na DP é máximo durante o processo de descarga.

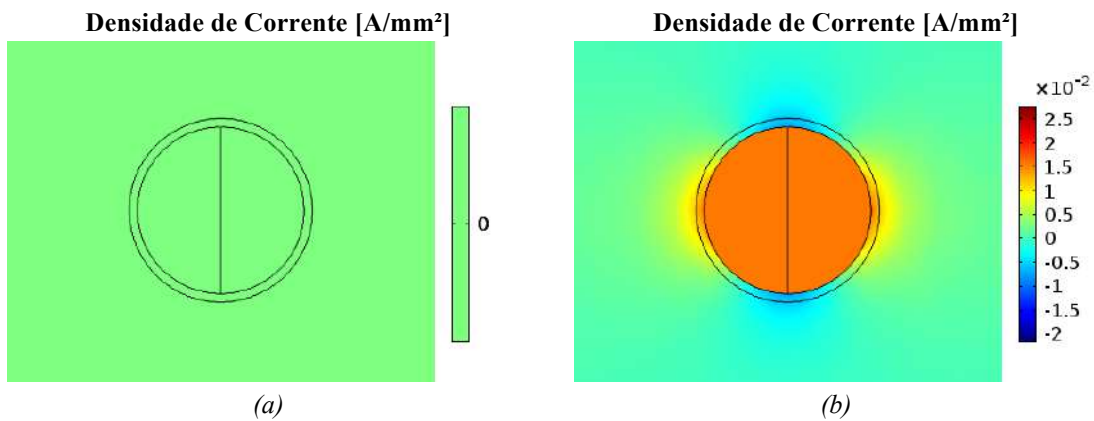


Figura 4-25: Distribuição de densidade de corrente no início e antes da DP (Zoom).

Na Figura 4-26 e na Figura 4-27 são apresentadas as densidades de corrente exatamente antes e no início da DP nas direções x e z, respectivamente, que condizem com as distribuições mostradas na Figura 4-25. Além disso, é possível perceber que a densidade de corrente é constante na direção z e aproximadamente constante em toda a cavidade.

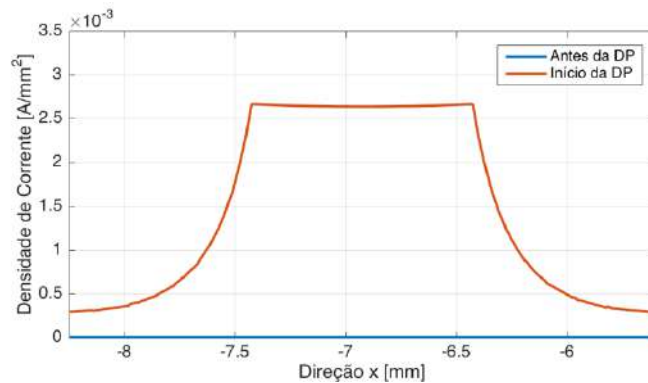


Figura 4-26: Curvas de densidade de corrente na direção x.

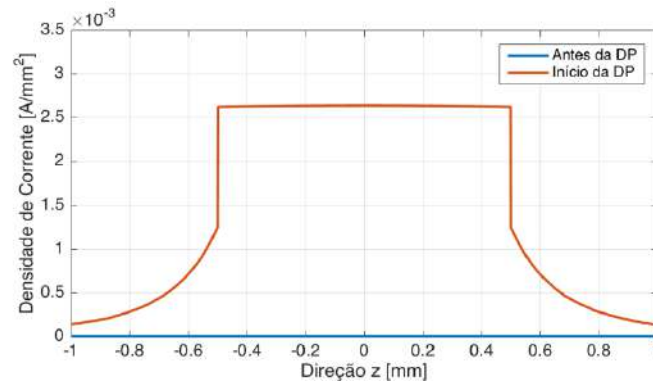


Figura 4-27: Curvas de densidade de corrente na direção z.

Mais uma vez, com o intuito de verificar o comportamento dinâmico das grandezas durante o processo de descarga para a bobina, as figuras subsequentes apresentam as formas de onda ampliadas, para a maior descarga positiva obtida na simulação de 10 ciclos da tensão aplicada para o caso base.

A Figura 4-28 mostra o campo elétrico no centro da cavidade durante o processo da DP, em que é possível perceber o decaimento do campo elétrico de seu valor máximo no início da DP a um valor próximo do campo elétrico de extinção, no fim da descarga.

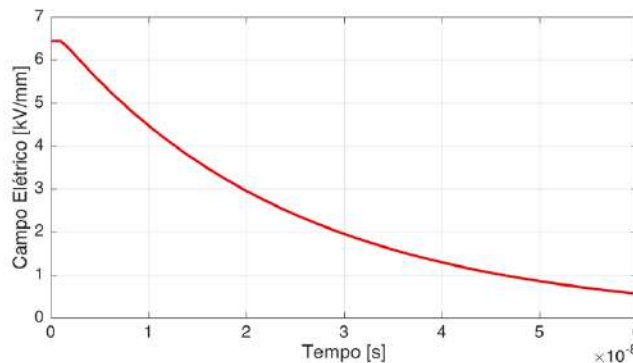


Figura 4-28: Forma de onda de campo elétrico no centro da cavidade (zoom).

Vale ressaltar que, devido ao atraso no início do processo de descarga, a DP ocorreu quando o campo elétrico na cavidade era muito superior ao campo elétrico de ruptura, o que ocasionou uma DP com maior amplitude de corrente, e consequentemente, de cargas, real e aparente.

Do mesmo modo, na Figura 4-29 pode ser vista a corrente na cavidade que, no início do processo de descarga, possui valor máximo e cai com o decaimento do campo elétrico na cavidade, tal como verificado para a geometria cilíndrica.

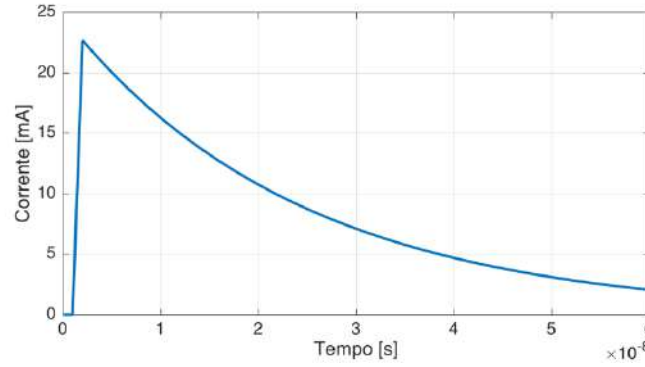


Figura 4-29: Forma de onda de corrente na cavidade (zoom).

As formas de onda das cargas, real e aparente, ampliadas podem ser vistas na Figura 4-30. No início do processo da DP, as amplitudes das cargas são iguais a zero e no fim do processo atingem seu valor máximo, tendo em vista que são resultados da integração no tempo da corrente na cavidade (carga real) e da corrente na superfície de aterramento da bobina (carga aparente).

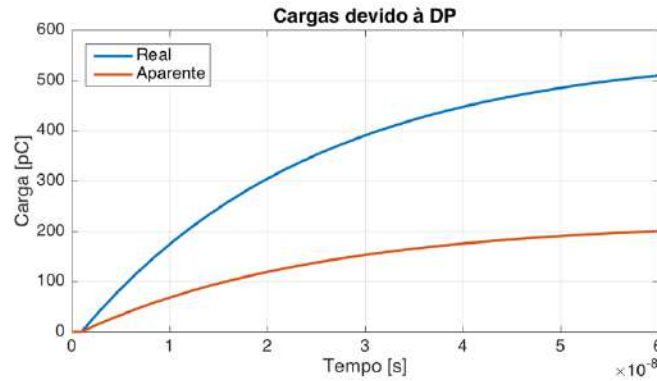


Figura 4-30: Formas de onda de carga (zoom).

Nos próximos itens são apresentados os resultados de simulação para diferentes situações a fim de comparar os resultados com o caso base. Desta forma, a Figura 4-31 e a Figura 4-32 mostram as formas de onda de campo elétrico e carga aparente, respectivamente, para 6 dos 10 ciclos simulados.

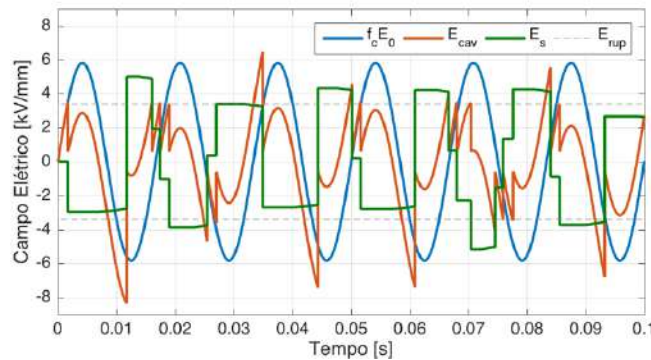


Figura 4-31: Caso base - formas de onda de campo elétrico.

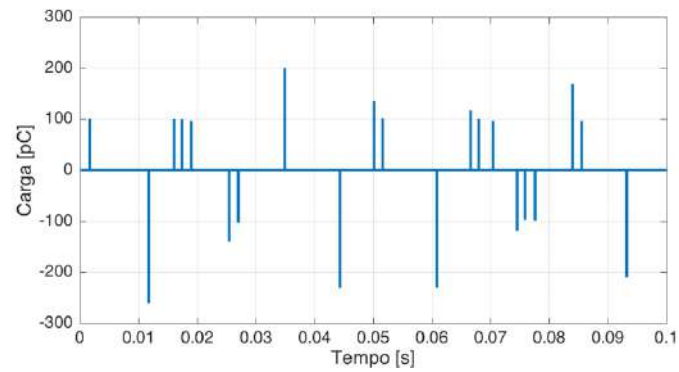


Figura 4-32: Caso base - forma de onda de carga aparente das DP's.

Além disso, são apresentados os parâmetros gerais dos resultados obtidos para 10 ciclos de simulação, os quais podem ser vistos na Tabela 4-2.

Tabela 4-2: Caso base - resultados gerais.

Resultado	Valor
Número médio de DP's por ciclo	4,0
Carga aparente total média por ciclo [pC]	511,3
Carga aparente média por DP [pC]	127,8
Intensidade da carga aparente máxima [pC]	272,3
Intensidade da carga aparente mínima [pC]	94,7

4.2.1 Caso 1: alteração da espessura da isolamento principal

Neste primeiro caso foram feitas simulações para diferentes espessuras da isolamento principal (h_{iso}) mantendo a cavidade no centro da isolamento. Na Figura 4-33 é possível ver um esquema que mostra o que é alterado na geometria para simulação deste caso.

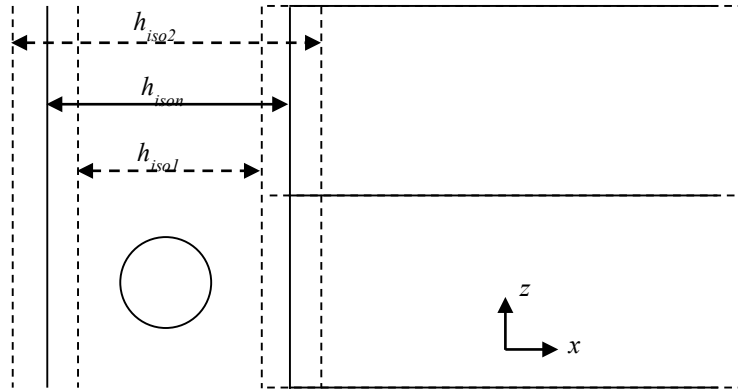


Figura 4-33: Esquema da bobina para variação da espessura do isolamento.

A alteração da espessura da isolamento principal altera o campo elétrico na geometria e, consequentemente, na cavidade. A Figura 4-34 apresenta a variação da intensidade do campo elétrico no centro da cavidade em função de h_{iso} , quando a tensão aplicada está em seu valor de pico, sendo possível notar que o campo elétrico na cavidade aumenta com a redução da espessura do isolamento.

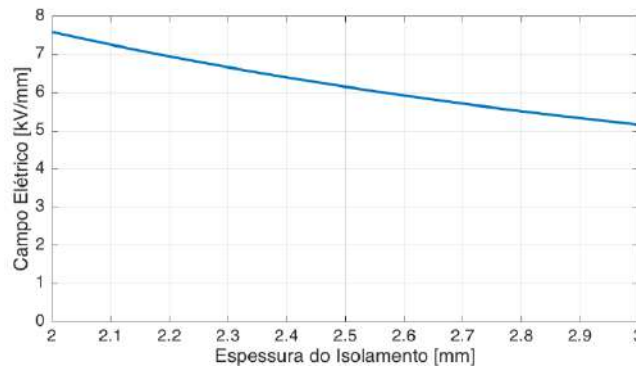


Figura 4-34: Campo elétrico em função da espessura do isolamento.

Adicionalmente, nas figuras a seguir é possível verificar as curvas de campo elétrico e tensão na geometria no instante em que a tensão aplicada possui valor máximo. A Figura 4-39 mostra a alteração da tensão na direção x da geometria para diferentes valores de espessura do isolamento.

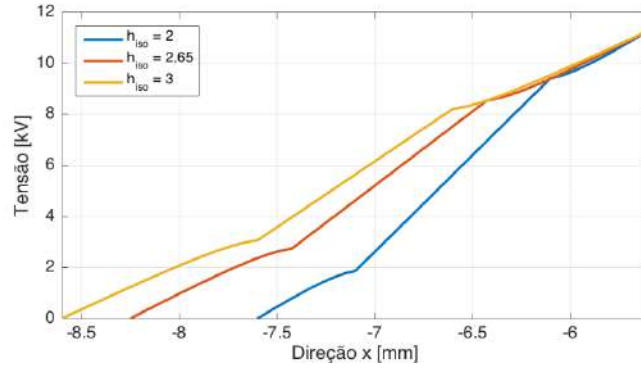


Figura 4-35: Caso 1 - curvas de tensão na direção x.

A diferença de tensão que a cavidade fica submetida é maior à medida em que a espessura do isolamento reduz, devido ao aumento do campo elétrico para menores valores de h_{iso} .

Do mesmo modo, a Figura 4-36 e a Figura 4-37 mostram a distribuição de campo elétrico, nas direções x e z, respectivamente, para diferentes valores de espessura do isolamento.

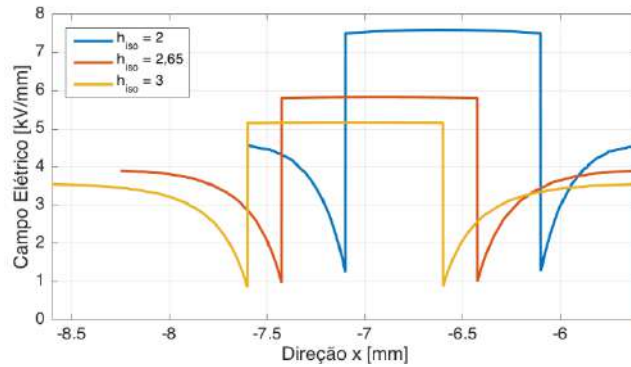


Figura 4-36: Caso 1 - curvas de campo elétrico na direção x.

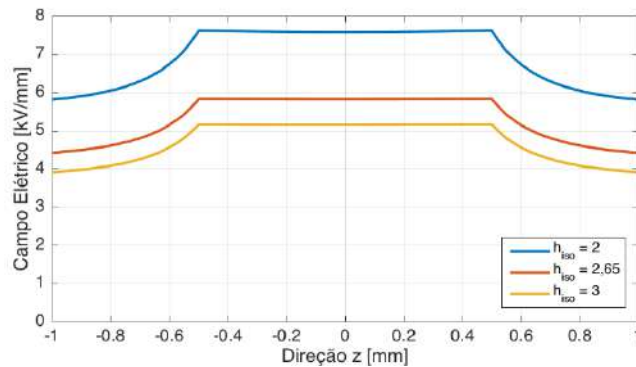


Figura 4-37: Caso 1 - curvas de campo elétrico na direção z

De acordo com Figura 4-36 e a Figura 4-37 é possível ver novamente o aumento do campo elétrico na geometria e no isolamento para menores valores de espessura do isolamento. Além disso, para todas as espessuras simuladas o campo elétrico na cavidade é constante.

A fim de simular os 10 ciclos da tensão aplicada para se obter os resultados gerais, para cada espessura da isolação principal, os parâmetros de simulação são revistos em relação aos valores utilizados no caso base. Foram feitas simulações para a espessura da isolação principal igual a 2 e 3 mm. A Tabela 4-3 mostra os valores utilizados nas simulações.

Tabela 4-3: Caso 1 - parâmetros de simulação.

Parâmetro	Símbolo	Valor
Espessura da isolação principal [mm]	h_{iso}	2 - 2,65 - 3
Amplitude da tensão aplicada [V]	V_{amp}	11267,65
Posição do centro da cavidade [mm]	x	x_n
Raio da cavidade esférica [mm]	$raio$	0,5
Campo elétrico de ruptura inicial [kV/mm]	E_{rup}	3,4
Temperatura da geometria [°C]	T_{mat}	20
Campo Elétrico de extinção inicial [kV/mm]	E_{ext}	0,585
Taxa de geração de elétrons devido ao volume [s ⁻¹]	N_v	7,8 - 6,4 - 5,5
Taxa de emissão de elétrons alta [s ⁻¹]	N_{es0A}	12573
Taxa de emissão de elétrons baixa [s ⁻¹]	N_{es0B}	6286
Condutividade máxima da superfície da cavidade [S/m]	σ_{supmax}	$3,57 \cdot 10^{-9}$
Constante de tempo de decaimento de carga de superfície [s]	τ_{dec}	$2 \cdot 10^{-3}$

De acordo com as considerações feitas no capítulo anterior, o único parâmetro que varia com a espessura do isolante é a taxa de geração de elétrons devido ao volume da cavidade (N_v), visto que a variação da espessura altera a tensão de ruptura. Os valores de N_v foram calculados com base na Equação (3-28) e no valor escolhido para o caso base.

Para cada simulação, a fim de comparar os resultados, são apresentadas as formas de onda de campo elétrico e de carga aparente para seis ciclos da tensão aplicada, bem como os resultados gerais. Neste sentido, a Figura 4-38 e a Figura 4-39 mostram as formas de onda para $h_{iso} = 2,0$ mm (caso 1.1), enquanto que a Figura 4-40 e a Figura 4-41 apresentam as curvas para $h_{iso} = 3,0$ mm (caso 1.2), para 6 ciclos da tensão aplicada.

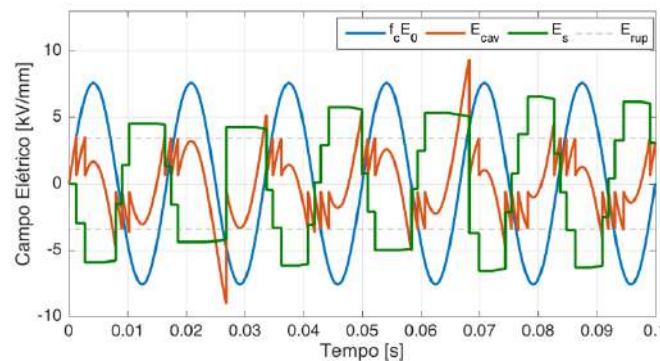


Figura 4-38: Caso 1.1 - formas de onda de campo elétrico.

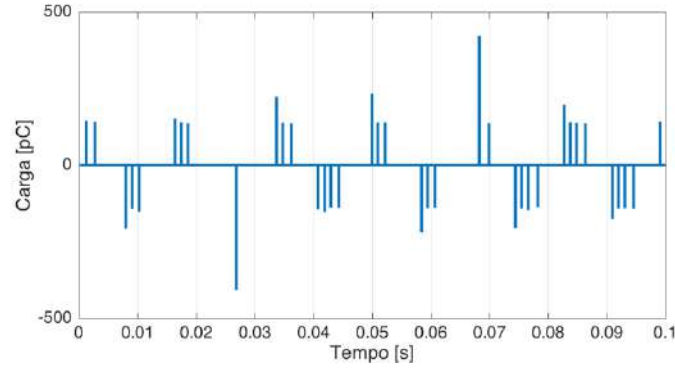


Figura 4-39: Caso 1.1 - forma de onda de carga aparente das DPs.

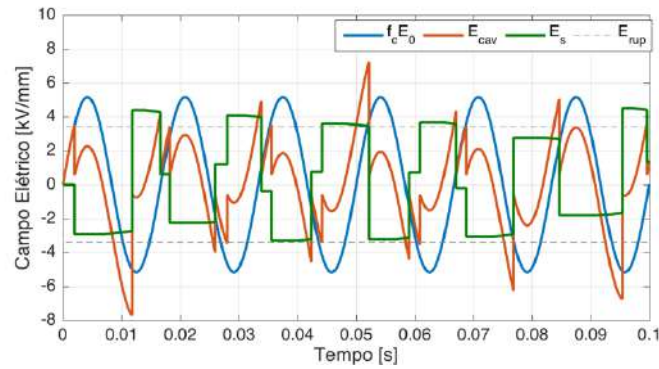


Figura 4-40: Caso 1.2 - formas de onda de campo elétrico.

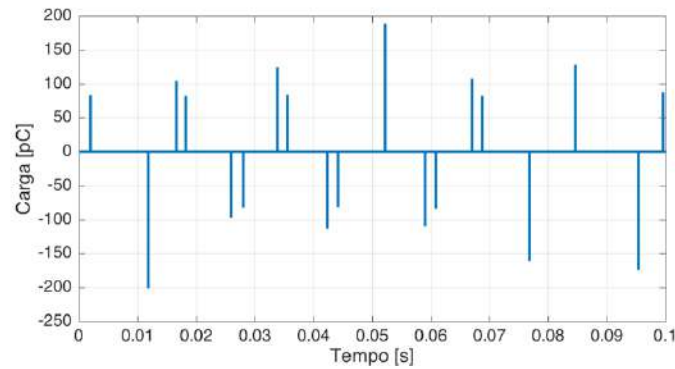


Figura 4-41: Caso 1.2 - forma de onda de carga aparente das DPs.

A Tabela 4-4 apresenta os resultados gerais para as espessuras do isolamento simuladas, incluindo o caso base.

Tabela 4-4: Caso 1 - resultados gerais.

Resultado	Espessura da isolação (h_{iso}) [mm]		
	2,0	2,65	3
Número médio de DPs por ciclo	6,2	4,0	3,1
Carga aparente total média por ciclo [pC]	1029,2	511,3	345,1
Carga aparente média por DP [pC]	166,0	127,8	111,3
Intensidade da carga aparente máxima [pC]	422,9	272,3	201,2
Intensidade da carga aparente mínima [pC]	136,3	94,7	80,7

De acordo com a Tabela 4-4 é visível o aumento do número médio de descargas por ciclo com a redução da espessura do isolamento, que acontece devido ao aumento do campo elétrico na cavidade para menores valores de h_{iso} . Consequentemente, a carga total aparente média por ciclo é maior para menores valores de espessura do isolamento. Para as intensidades de carga aparente máxima e mínima e carga aparente média por DP, obteve-se valores maiores para menores valores h_{iso} , o que pode ser explicado, pois de acordo com [19][21] a intensidade da carga aparente depende da espessura do isolamento, sendo menor para maiores valores de h_{iso} .

4.2.2 Caso 2: alteração da amplitude da tensão aplicada

Neste caso foram feitas simulações para diferentes amplitudes da tensão aplicada (V_{amp}). Em uma máquina elétrica, cujo enrolamento do estator é conectado em estrela, devido à conexão em série, as bobinas mais próximas dos terminais da máquina ficam submetidas a um maior nível de tensão, quando comparadas com as bobinas que ficam mais próximas do fechamento do neutro. Neste sentido, é válida a simulação de uma tensão aplicada menor que a tensão nominal da máquina, que corresponde a bobinas que não estão conectadas aos terminais da máquina. Além disso, é também simulada uma tensão aplicada maior que a nominal. A alteração da amplitude da tensão aplicada altera o campo elétrico na geometria e, consequentemente, na cavidade. A Figura 4-42 apresenta a variação da intensidade do campo elétrico no centro da cavidade em função de V_{amp} , quando a tensão aplicada está em seu valor de pico.

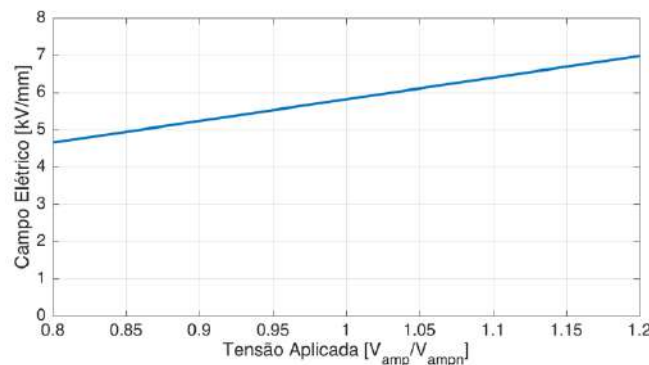


Figura 4-42: Campo elétrico em função da amplitude da tensão aplicada.

De acordo com Figura 4-42 é possível perceber um aumento linear do campo elétrico na cavidade com o aumento da tensão aplicada.

Nas figuras a seguir é possível verificar as curvas de campo elétrico e tensão na geometria no instante em que a tensão aplicada possui valor máximo. A Figura 4-43 mostra a alteração da tensão na direção x da geometria para diferentes valores de amplitude da tensão aplicada, em que é possível ver que a cavidade fica submetida a um maior diferencial de tensão para maiores valores de V_{amp} .

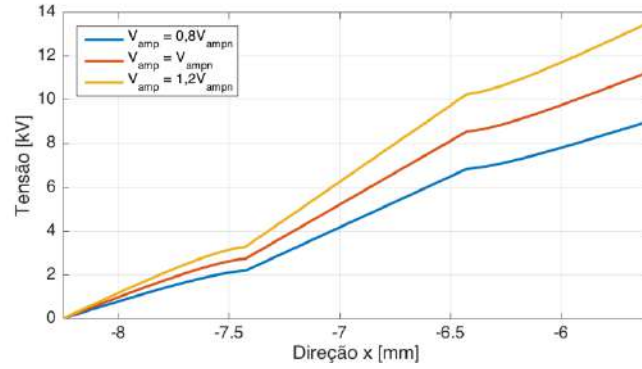


Figura 4-43: Caso 2 - curvas de tensão na direção x.

Do mesmo modo, a Figura 4-44 e a Figura 4-45 mostram a distribuição de campo elétrico, nas direções x e z, respectivamente, para diferentes valores da amplitude da tensão aplicada.

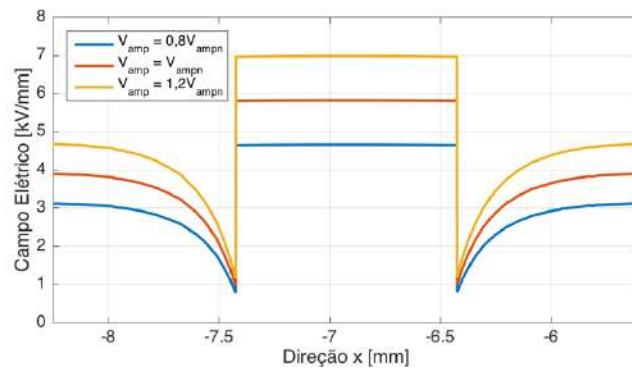


Figura 4-44: Caso 2 - curvas de campo elétrico na direção x.

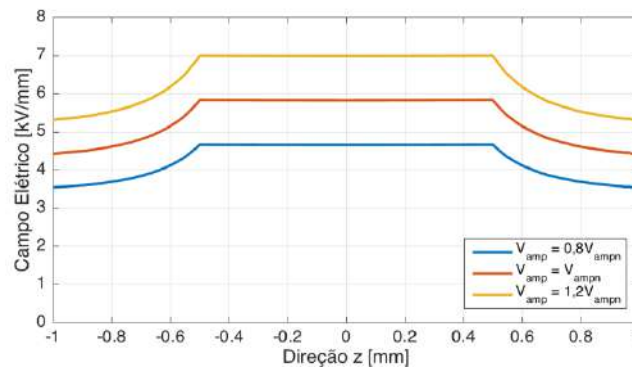


Figura 4-45: Caso 2 - curvas de campo elétrico na direção z.

De acordo com a Figura 4-44 e a Figura 4-45 o campo elétrico na cavidade e na isolamento principal é maior para maiores amplitudes da tensão aplicada e é constante para todos os valores simulados.

Os parâmetros de simulação para este caso podem ser vistos na Tabela 4-5. Foram feitas simulações para amplitude da tensão aplicada igual a $0,8V_{ampn}$ e $1,2V_{ampn}$, sendo V_{ampn} a amplitude nominal, relativa ao caso base.

Tabela 4-5: Caso 2 - parâmetros de simulação.

Parâmetro	Símbolo	Valor
Amplitude da tensão aplicada [V]	V_{amp}	$(0,8 - 1 - 1,2) V_{ampn}$
Espessura da isolamento principal [mm]	h_{iso}	2,65
Posição do centro da cavidade [mm]	x	x_n
Raio da cavidade esférica [mm]	$raio$	0,5
Campo elétrico de ruptura inicial [kV/mm]	E_{rup}	3,4
Temperatura da geometria [°C]	T_{mat}	20
Campo Elétrico de extinção inicial [kV/mm]	E_{ext}	0,585
Taxa de geração de elétrons devido ao volume [s^{-1}]	N_v	4,5 – 6,4 – 7,5
Taxa de emissão de elétrons alta [s^{-1}]	N_{es0A}	12573
Taxa de emissão de elétrons baixa [s^{-1}]	N_{es0B}	6286
Condutividade máxima da superfície da cavidade [S/m]	σ_{supmax}	$3,57 \cdot 10^{-9}$
Constante de tempo de decaimento de carga de superfície [s]	τ_{dec}	$2 \cdot 10^{-3}$

Mais uma vez, de acordo com as considerações feitas no capítulo anterior, o único parâmetro que varia com a amplitude da tensão aplicada é a taxa de geração de elétrons devido ao volume da cavidade (N_v) tal como indicado pela Equação (3-28).

A Figura 4-46 e a Figura 4-47 apresentam as formas de onda para $V_{amp} = 9,014$ kV (caso 2.1), enquanto que a Figura 4-48 e a Figura 4-49 apresentam as curvas para $V_{amp} = 13,521$ kV (caso 2.2), para 6 ciclos da tensão aplicada.

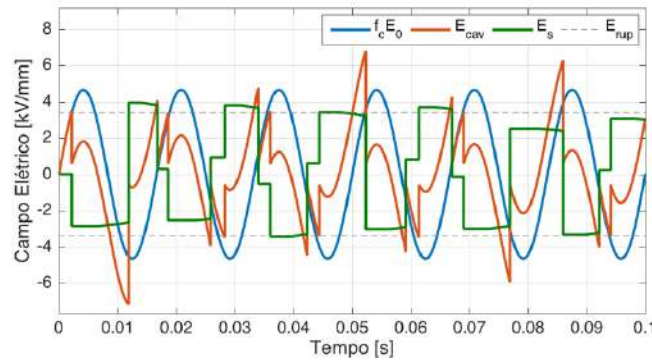


Figura 4-46: Caso 2.1 - formas de onda de campo elétrico.

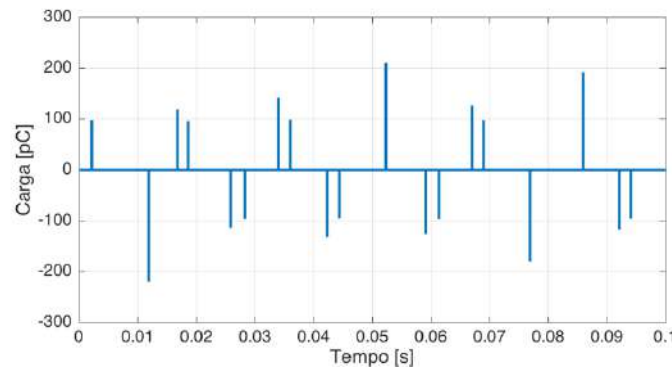


Figura 4-47: Caso 2.1 - forma de onda de carga aparente das DPs.

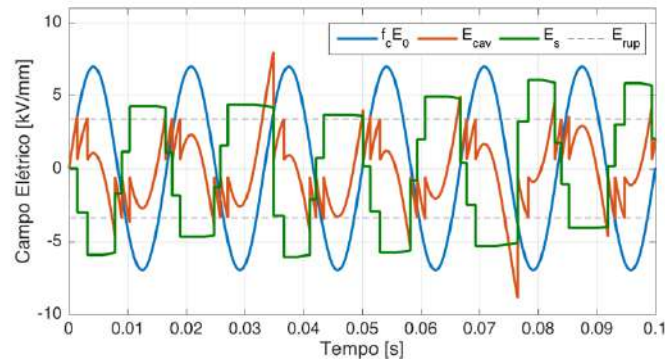


Figura 4-48: Caso 2.2 - formas de onda de campo elétrico.

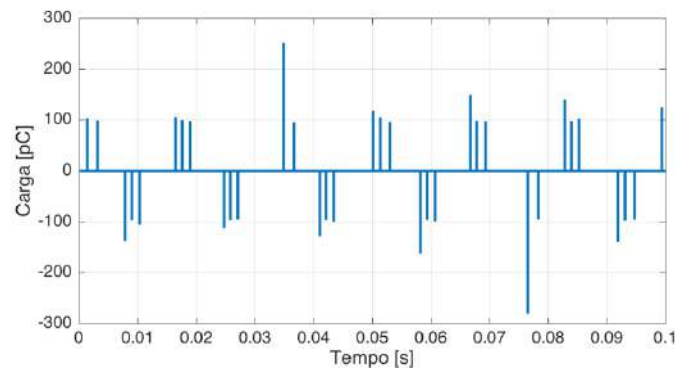


Figura 4-49: Caso 2.2 - forma de onda de carga aparente das DPs.

A Tabela 4-6 apresenta os resultados gerais para as espessuras do isolamento simuladas.

Tabela 4-6: Caso 2 - resultados gerais.

Resultado	Tensão aplicada (V_{amp}) [kV]		
	9,014	11,268	13,521
Número médio de DPs por ciclo	2,6	4,0	5,4
Carga aparente total média por ciclo [pC]	349,2	511,3	659,6
Carga aparente média por DP [pC]	134,3	127,8	122,1
Intensidade da carga aparente máxima [pC]	220,5	272,3	324,0
Intensidade da carga aparente mínima [pC]	95,4	94,7	95,2

De acordo com a Tabela 4-6 percebe-se o aumento do número médio de descargas por ciclo com a aumento da amplitude da tensão aplicada, que ocorre, tal como no caso 1, devido ao aumento do campo elétrico na cavidade para maiores valores de V_{amp} . Por consequência, a carga total aparente média por ciclo é maior para maiores valores da tensão aplicada. Os valores de carga aparente mínima foram aproximadamente os mesmos. Já os valores obtidos para carga aparente média por DP e intensidade de carga aparente máxima são resultados aleatórios, devido ao caráter estatístico da DP.

4.2.3 Caso 3: alteração da posição da cavidade

No terceiro caso foram feitas simulações para diferentes posições da cavidade, ou seja, em cada simulação foram alteradas as coordenadas do centro da cavidade esférica. Para as simulações alterou-se somente a coordenada do eixo x do centro da cavidade. A Figura 4-50 mostra o esquema da alteração da posição da cavidade.

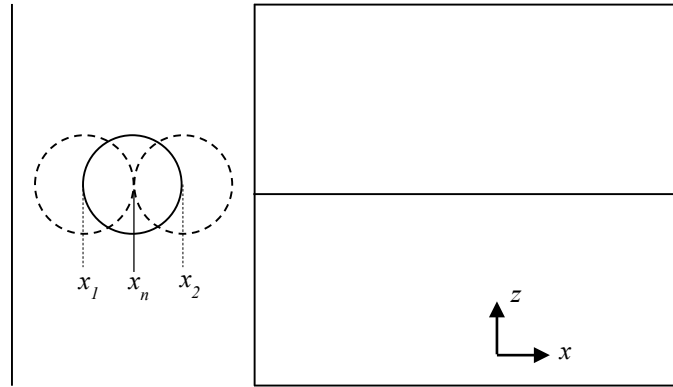


Figura 4-50: Esquema da bobina para variação da posição da cavidade.

Foram simuladas duas posições, $x_{1,2} = x_n \pm 0,5 \text{ mm}$, onde x_n é a coordenada do eixo x para o caso base, e “+” significa que a cavidade foi deslocada para mais próximo dos condutores e “-” que a cavidade está mais próxima do núcleo, ou seja, da superfície aterrada da bobina. A alteração da posição da cavidade provoca uma alteração quase insignificante do campo elétrico no centro da cavidade, em função da proximidade dos condutores ou da superfície aterrada. A Figura 4-51 apresenta a variação da intensidade do campo elétrico no centro da cavidade em função da alteração da posição da cavidade, quando a tensão aplicada está em seu valor de pico.

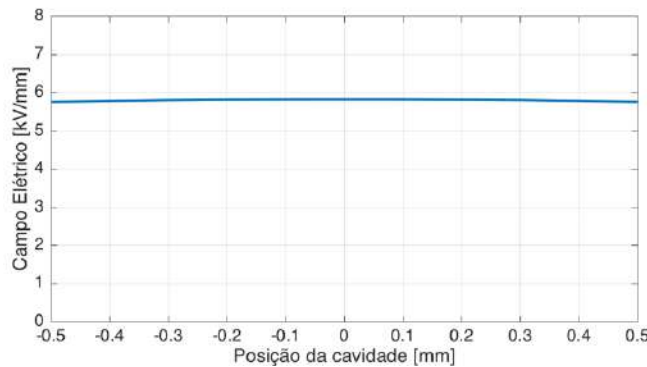


Figura 4-51: Campo elétrico em função da posição da cavidade.

Na Figura 4-51 quase não é possível ver a pequena variação na intensidade do campo elétrico no centro da cavidade, que acontece quando a cavidade se aproxima dos condutores e da superfície aterrada. Adicionalmente, nas figuras a seguir é possível verificar o campo elétrico e a tensão na geometria, no instante em que a tensão aplicada possui valor máximo. A Figura 4-52 mostra a alteração da tensão na direção x da geometria para diferentes posições da cavidade dentro do isolamento.

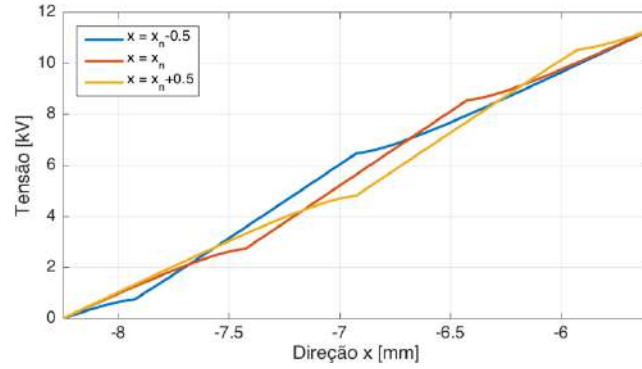


Figura 4-52: Caso 3 - curvas de tensão na direção x .

Na Figura 4-52 nota-se que a alteração da posição da cavidade apenas muda a localização em que o diferencial de tensão ocorre no isolamento. Do mesmo modo, a Figura 4-53 e a Figura 4-54 mostram a distribuição de campo elétrico, nas direções x e z , respectivamente, para diferentes posições da cavidade.

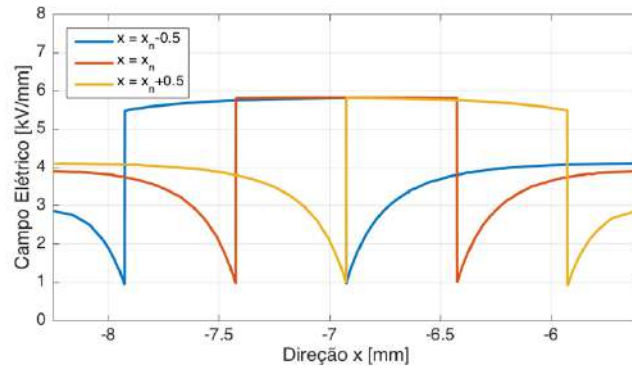


Figura 4-53: Caso 3 - curvas de campo elétrico na direção x .

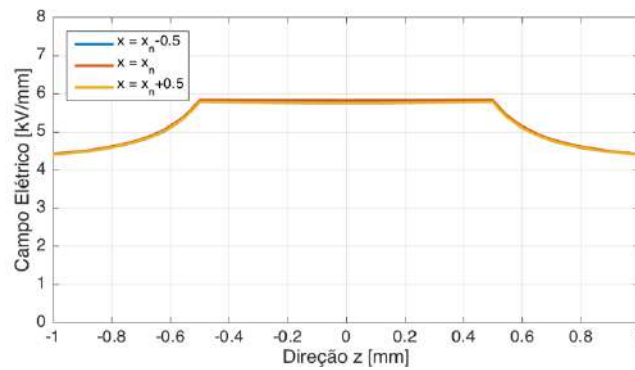


Figura 4-54: Caso 3 - curvas de campo elétrico na direção z .

Com base nas figuras anteriores percebe-se a pequena variação na intensidade do campo elétrico no centro da cavidade. Na direção z praticamente não há alteração, no entanto, na direção x é possível notar que o campo elétrico é reduzido para posições mais próximas dos condutores ou da superfície aterrada da bobina.

Os parâmetros de simulação para este caso podem ser vistos na Tabela 4-7. Foram feitas simulações para as posições $x_n - 0,5$ mm (caso 3.1) e $x_0 + 0,5$ mm (caso 3.2) e comparados com o caso base (x_n).

Tabela 4-7: Caso 3 - parâmetros de simulação.

Parâmetro	Símbolo	Valor
Posição do centro da cavidade no eixo x [mm]	x	$x_n - 0,5 - x_n - x_n + 0,5$
Amplitude da tensão aplicada [V]	V_{amp}	11267,65
Espessura da isolamento principal [mm]	h_{iso}	2,65
Raio da cavidade esférica [mm]	$raio$	0,5
Campo elétrico de ruptura inicial [kV/mm]	E_{rup}	3,4
Temperatura da geometria [°C]	T_{mat}	20
Campo Elétrico de extinção inicial [kV/mm]	E_{ext}	0,585
Taxa de geração de elétrons devido ao volume [s^{-1}]	N_v	6,3 – 6,4- 6,3
Taxa de emissão de elétrons alta [s^{-1}]	N_{es0A}	12573
Taxa de emissão de elétrons baixa [s^{-1}]	N_{es0B}	6286
Condutividade máxima da superfície da cavidade [S/m]	σ_{supmax}	$3,57 \cdot 10^{-9}$
Constante de tempo de decaimento de carga de superfície [s]	τ_{dec}	$2 \cdot 10^{-3}$

Novamente, de acordo com as considerações feitas no capítulo anterior, o único parâmetro que varia com posição da cavidade é a taxa de geração de elétrons devido ao volume da cavidade (N_v), que de acordo com a Equação (3-28) depende da amplitude da tensão de ruptura. Conforme apresentado pela Figura 4-51 o campo elétrico no centro da cavidade altera-se ligeiramente com a posição da cavidade, o que leva a valores de tensão de ruptura com pequenas diferenças para cada simulação.

A Figura 4-55 e a Figura 4-56 apresentam as formas de onda para $x_n - 0,5$ m'm (caso 3.1), enquanto que a Figura 4-57 e a Figura 4-58 apresentam as curvas para $x_n + 0,5$ mm (caso 3.2), para 6 ciclos da tensão aplicada.

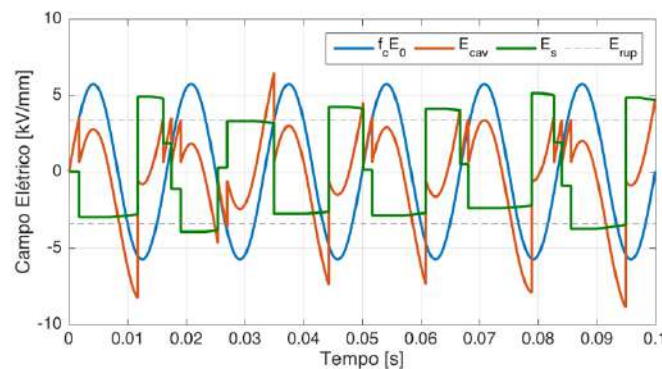


Figura 4-55: Caso 3.1 - formas de onda de campo elétrico.

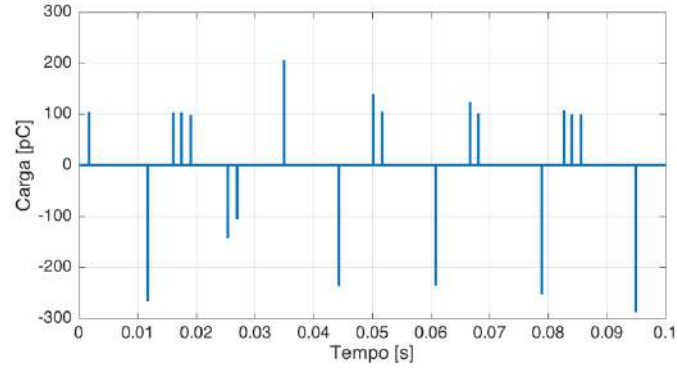


Figura 4-56: Caso 3.1 - forma de onda de carga aparente das DP's.

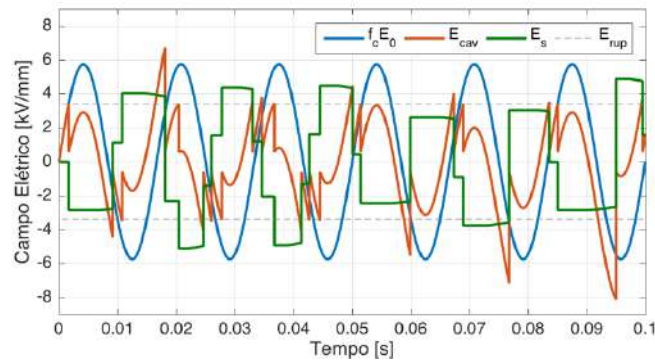


Figura 4-57: Caso 3.2 - formas de onda de campo elétrico.

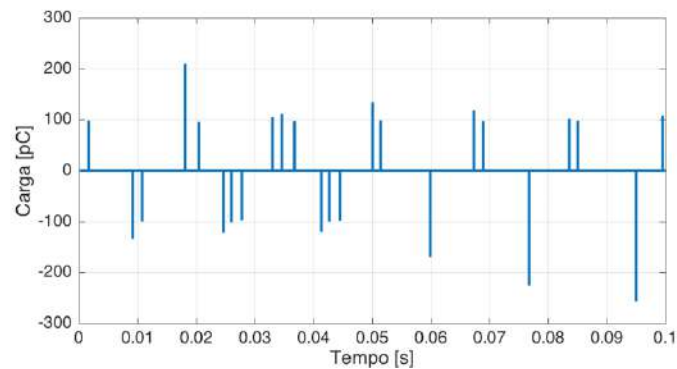


Figura 4-58: Caso 3.2 - forma de onda de carga aparente das DP's.

A Tabela 4-8 apresenta os resultados gerais para as espessuras do isolamento simuladas.

Tabela 4-8: Caso 3 - resultados gerais.

Resultado	Posição da Cavidade (x) [mm]		
	$x_n - 0,5$	x_n	$x_n + 0,5$
Número médio de DP's por ciclo	4,0	4,0	4,1
Carga aparente total média por ciclo [pC]	546,7	511,3	510,7
Carga aparente média por DP [pC]	136,7	127,8	124,6
Intensidade da carga aparente máxima [pC]	287,8	272,3	256,2
Intensidade da carga aparente mínima [pC]	98,1	94,7	95,9

De acordo com os resultados da Tabela 4-8 percebe-se valores aproximadamente iguais para todas as simulações. Os resultados similares eram esperados, uma vez que praticamente não houve mudança nos parâmetros usados nas simulações. As pequenas diferenças encontradas são relativas ao caráter estatístico da DP.

4.2.4 Caso 4: alteração do raio da cavidade

Neste estudo foram feitas simulações para diferentes tamanhos da cavidade, ou seja, diferentes valores de raio. A Figura 4-59 mostra a alteração do esquema de simulação quando o raio da cavidade esférica é alterado.

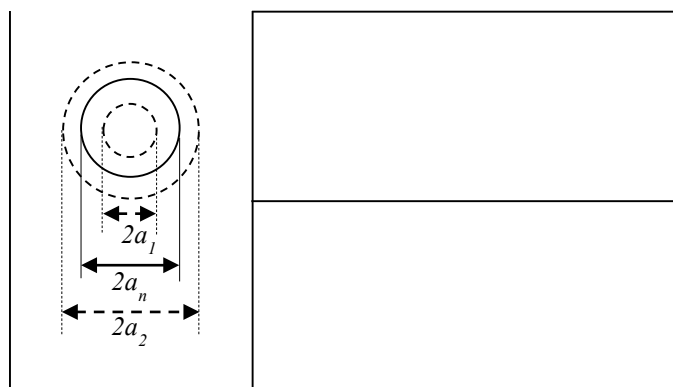


Figura 4-59: Esquema da bobina para variação do raio da cavidade.

A Figura 4-60 apresenta a variação da intensidade do campo elétrico no centro da cavidade em função da alteração do raio da cavidade, quando a tensão aplicada está em seu valor máximo. Conforme pode-se perceber, a intensidade do campo elétrico no centro da cavidade é praticamente independente do raio da cavidade, somente para raios maiores percebe-se uma pequena redução, que é devido à proximidade da cavidade com os condutores e com a superfície aterrada da bobina.

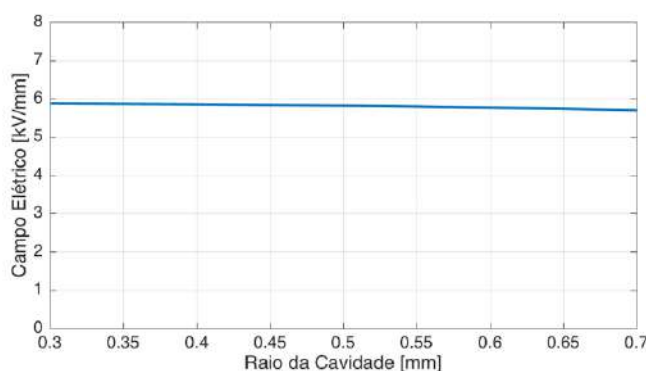


Figura 4-60: Campo elétrico em função do raio da cavidade.

Além disso, nas figuras a seguir é possível verificar as curvas de campo elétrico e tensão na geometria no instante em que a tensão aplicada possui valor máximo. A Figura 4-61 mostra a alteração da tensão na direção x da geometria para diferentes raios da

cavidade. Nota-se que à medida que o raio da cavidade aumenta, maior é a região do isolamento que fica submetida a um maior diferencial de tensão e, consequentemente, a porção restante do isolante fica submetida a um menor diferencial de tensão para cavidades maiores.

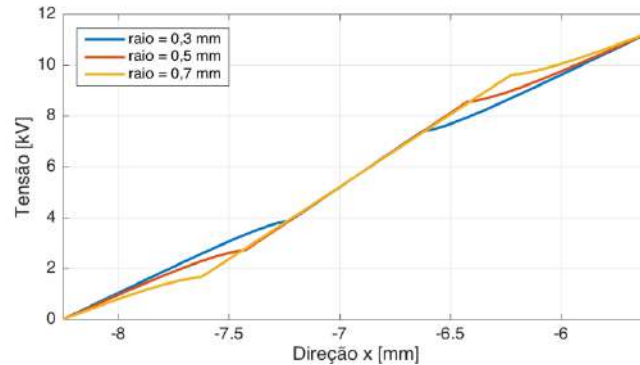


Figura 4-61: Caso 4 - curvas de tensão na direção x.

Analogamente, a Figura 4-62 e a Figura 4-63 mostram a distribuição de campo elétrico, nas direções x e z, respectivamente, para diferentes raios da cavidade.

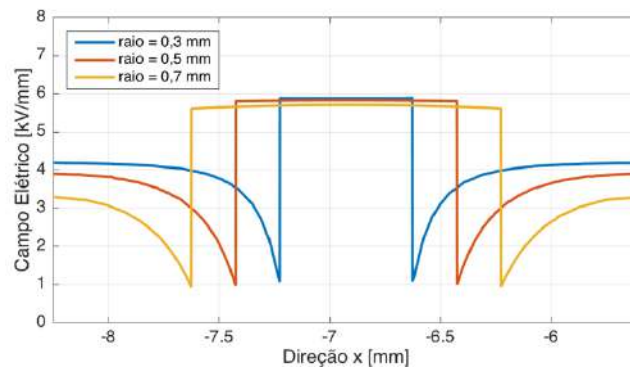


Figura 4-62: Caso 4 - curvas de campo elétrico na direção x.

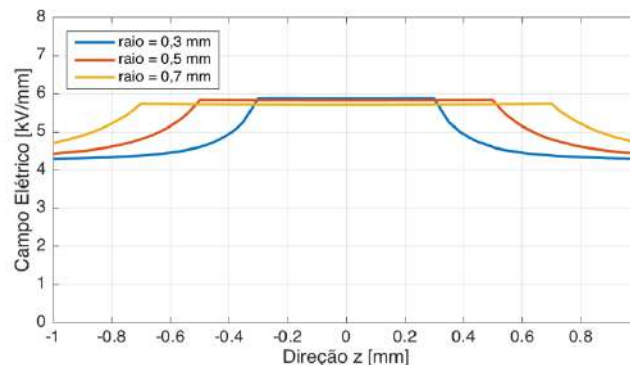


Figura 4-63: Caso 4 - curvas de campo elétrico na direção z.

Nas figuras anteriores nota-se que, conforme já mencionado, para maiores cavidades o campo elétrico na cavidade na direção z, apesar de uniforme, é menor devido à proximidade da cavidade aos condutores e à superfície aterrada, o que leva também a uma pequena não uniformidade do campo elétrico no eixo x.

Os parâmetros de simulação para este caso podem ser vistos na Tabela 4-9. Foram feitas simulações para os raios de 0,3 mm e 0,7 mm, e comparados com o caso base 0,5 mm.

Tabela 4-9: Caso 4 - parâmetros de simulação.

Parâmetro	Símbolo	Valor
Raio da cavidade esférica [mm]	$raio$	0,3 - 0,5 - 0,7
Amplitude da tensão aplicada [V]	V_{amp}	11267,65
Espessura da isolação principal [mm]	h_{iso}	2,65
Posição do centro da cavidade no eixo x [mm]	x	x_n
Campo elétrico de ruptura inicial [kV/mm]	E_{rup}	3,9 - 3,4 - 3,1
Temperatura da geometria [°C]	T_{mat}	20
Campo Elétrico de extinção inicial [kV/mm]	E_{ext}	0,585
Taxa de geração de elétrons devido ao volume [s^{-1}]	N_v	5,5 - 6,4 - 6,9
Taxa de emissão de elétrons alta [s^{-1}]	N_{es0A}	14318 - 12573 - 9955
Taxa de emissão de elétrons baixa [s^{-1}]	N_{es0B}	7159 - 6286 - 4977
Condutividade máxima da superfície da cavidade [S/m]	σ_{supmax}	$(2,14 - 3,57 - 5) \cdot 10^{-9}$
Constante de tempo de decaimento de carga de superfície [s]	τ_{dec}	$2 \cdot 10^{-3}$

De acordo com a Equação (3-2) o campo elétrico de ruptura depende do raio paralelo ao campo elétrico aplicado, que no caso da cavidade esférica é o próprio raio da cavidade. Desta forma, o campo elétrico de ruptura para cada raio simulado foi calculado de acordo com a Equação (3-2) considerando a mesma pressão da cavidade utilizada para o caso base.

A taxa de geração de elétrons devido ao volume da cavidade (N_v), de acordo com as considerações feitas pela Equação (3-28), depende da amplitude da tensão de ruptura e dos raios paralelo e perpendicular ao campo elétrico aplicado (iguais para a cavidade esférica, ou seja, $a = b$). Além disso, conforme apresentado pela Figura 4-60 o campo elétrico no centro da cavidade altera-se ligeiramente com o raio da cavidade, o que leva a diferentes valores para a tensão de ruptura e, consequentemente, influi no valor de emissão de elétrons devido ao volume da cavidade.

As taxas de emissão de superfície alta e baixa, foram consideradas como dependentes da área da superfície da cavidade e os valores utilizados foram obtidos com base nos resultados obtidos em [4], que foram considerados como sendo menores para maiores áreas de superfície.

A condutividade da superfície da cavidade foi considerada como sendo proporcional ao raio paralelo ao campo aplicado.

A Figura 4-64 e a Figura 4-65 apresentam as formas de onda para o raio de 0,3 mm (caso 4.1), enquanto que a Figura 4-66 e a Figura 4-67 apresentam as curvas para o raio de 0,7 mm (caso 4.2), para seis ciclos da tensão aplicada.

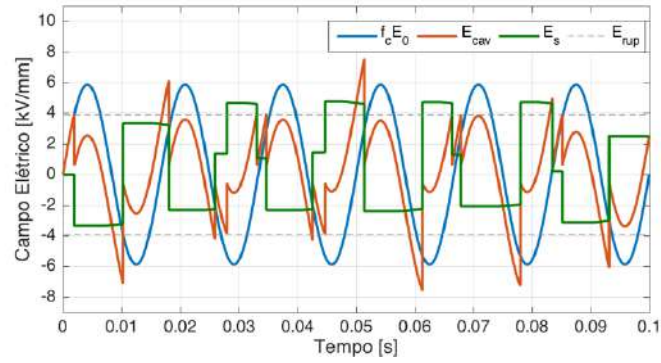


Figura 4-64: Caso 4.1 - formas de onda de campo elétrico.

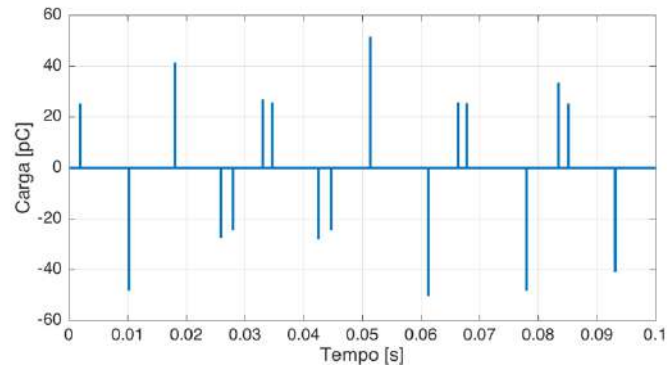


Figura 4-65: Caso 4.1 - forma de onda de carga aparente das DPs.

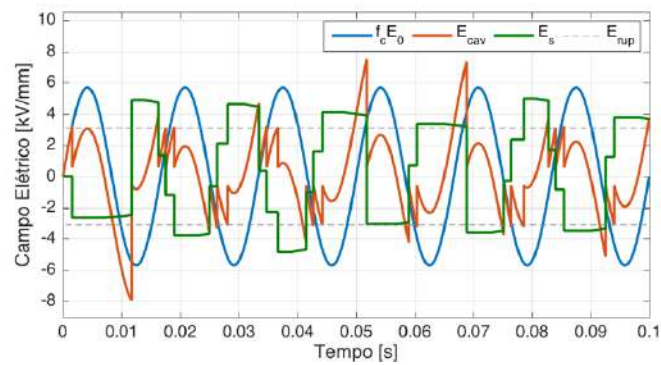


Figura 4-66: Caso 4.2 - formas de onda de campo elétrico.

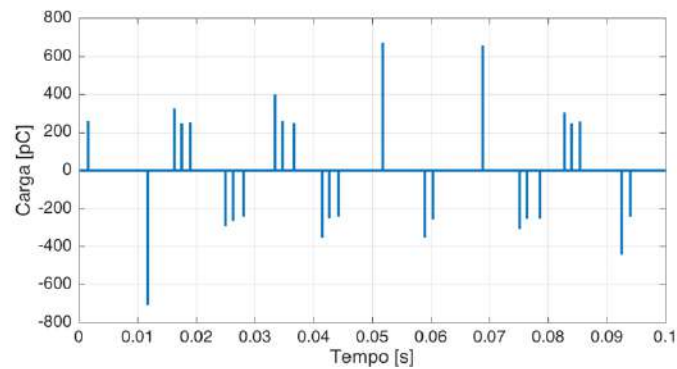


Figura 4-67: Caso 4.2 - forma de onda de carga aparente das DPs.

A Tabela 4-10 apresenta os resultados gerais para os raios da cavidade simulados.

Tabela 4-10: Caso 4 - resultados gerais.

Resultado	Raio da cavidade [mm]		
	0,3	0,5	0,7
Número médio de DPs por ciclo	3,0	4,0	4,5
Carga aparente total média por ciclo [pC]	99,2	511,3	1477,3
Carga aparente média por DP [pC]	33,1	127,8	328,3
Intensidade da carga aparente máxima [pC]	58,9	272,3	750,4
Intensidade da carga aparente mínima [pC]	23,9	94,7	244,4

De acordo com os dados apresentados na Tabela 4-10 obteve-se menor número de descargas por ciclo e, consequentemente, menor carga aparente total por ciclo, para os menores raios da cavidade. Vale ressaltar que o baixo número médio de DPs para a menor cavidade se deve ao fato de que o campo elétrico de ruptura é maior para cavidades com raio paralelo ao campo elétrico aplicado menor. Conforme consideração feita, as taxas de emissão de elétrons alta e baixa (N_{es0A} e N_{es0B}) reduzem para maiores raios, o que tenderia a reduzir o número médio de DPs por ciclo, todavia, o número de DPs por ciclo foi compensado pela redução do campo elétrico de ruptura para os raios simulados. Além disso, pode-se ver claramente que as intensidades de carga aparente máxima e mínima e carga aparente média por DP, são maiores para as cavidades maiores, uma vez que quanto maior a seção transversal da cavidade maior a intensidade de corrente e, consequentemente, maiores intensidades de cargas real e aparente.

4.2.5 Caso 5: alteração da temperatura da geometria

Neste último caso, para a bobina com cavidade esférica, foram feitas simulações para diferentes valores de temperatura inicial da geometria (T_{mat}), o que inclui isolante condutores e cavidade, ou seja, a temperatura é considerada como sendo igual em toda a geometria. Além disso, o efeito da elevação da temperatura devido à descarga não é considerado neste caso, desta forma, nas simulações aqui apresentadas a temperatura da geometria permanece constante durante toda a simulação.

O campo elétrico máximo no centro da cavidade não depende da temperatura e, portanto para os casos aqui simulados não há alteração do campo elétrico na geometria para os diferentes valores de temperatura simulados.

Os parâmetros usados para simulação dos 10 ciclos da tensão aplicada podem ser vistos na Tabela 4-11. Foram feitas simulações para temperaturas de 40 °C e 60 °C.

Tabela 4-11: Caso 5 - parâmetros de simulação.

Parâmetro	Símbolo	Valor
Temperatura inicial da geometria [°C]	T_{mat}	20 - 40 - 60
Raio da cavidade esférica [mm]	$raio$	0,5
Amplitude da tensão aplicada [V]	V_{amp}	11267,65
Espessura da isolação principal [mm]	h_{iso}	2,65
Posição do centro da cavidade no eixo x [mm]	x	x_n
Campo elétrico de ruptura inicial [kV/mm]	E_{rup}	3,4 - 3,6 - 3,7
Campo Elétrico de extinção inicial [kV/mm]	E_{ext}	0,585 - 0,625 - 0,665
Taxa de geração de elétrons devido ao volume [s ⁻¹]	N_v	6,4 - 6,9 - 7,3
Taxa de emissão de elétrons alta [s ⁻¹]	N_{es0A}	12573 - 13430 - 14288
Taxa de emissão de elétrons baixa [s ⁻¹]	N_{es0B}	6286 - 6715 - 7144
Condutividade máxima da superfície da cavidade [S/m]	σ_{supmax}	(3,57 - 5,9 - 7)·10 ⁻⁹
Constante de tempo de decaimento de superfície [s]	τ_{dec}	(2 - 3,3 - 3,9)·10 ⁻³

Em [4] a maioria dos parâmetros foram considerados como dependentes da temperatura da geometria. Desta forma, neste trabalho foram feitas algumas considerações para se chegar nos parâmetros para cada temperatura simulada. Para se obter os parâmetros usa-se a temperatura em Kelvin, exceto para a taxa de decaimento de cargas de superfície e condutividade máxima da superfície da cavidade em que foi utilizada a temperatura em graus Celsius.

O campo de ruptura (E_{rup}), de acordo com a Equação (3-2), depende da pressão da cavidade e, deste modo, foi considerado que a elevação de temperatura altera proporcionalmente a pressão na cavidade. Neste sentido, os valores de campo de ruptura foram calculados de acordo com Equação (3-2) para cada temperatura simulada.

Para o campo de extinção (E_{ext}) da DP foi feita a mesma consideração, ou seja, a pressão da cavidade varia proporcionalmente com a temperatura. Tendo-se a pressão para cada temperatura, foi utilizada a Equação (3-27) para obtenção de E_{ext} .

Com relação às taxas de emissão de elétrons devido ao volume da cavidade e devido à emissão de superfície alta e baixa, em [4] foram encontradas como sendo maiores para temperaturas maiores. Neste sentido, por simplicidade, neste trabalho as taxas de geração de elétrons foram consideradas como sendo diretamente proporcionais à temperatura.

De acordo com os resultados em [4] a constante de tempo de decaimento das cargas de superfície e a condutividade máxima da superfície da cavidade aumentam exponencialmente com o aumento da temperatura. Logo, por simplicidade, considerou que tais grandezas aumentam exponencialmente com o aumento da temperatura.

As curvas para 40 °C (caso 5.1) podem ser vistas na Figura 4-68 e na Figura 4-69.

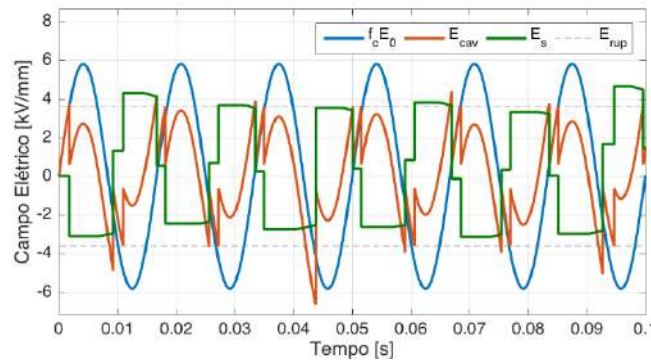


Figura 4-68: Caso 5.1 - formas de onda de campo elétrico.

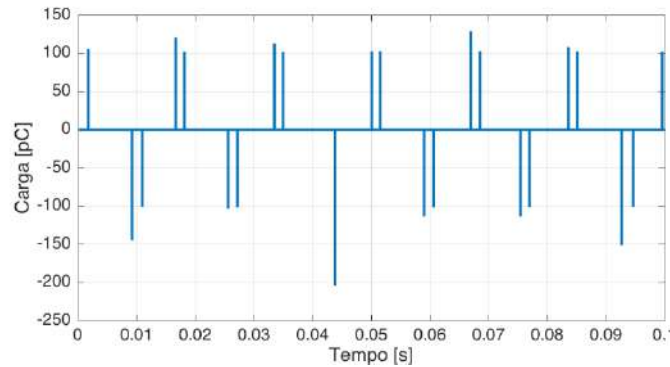


Figura 4-69: Caso 5.1 - forma de onda de carga aparente das DPs.

E, finalmente, as curvas para 60 °C (caso 5.2) podem ser vistas na Figura 4-70 e na Figura 4-71.

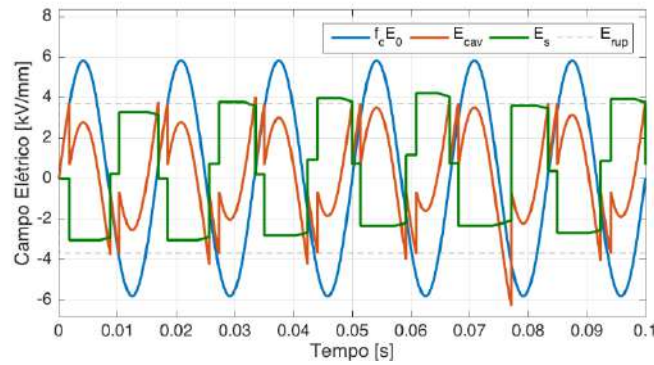


Figura 4-70: Caso 5.2 - formas de onda de campo elétrico.

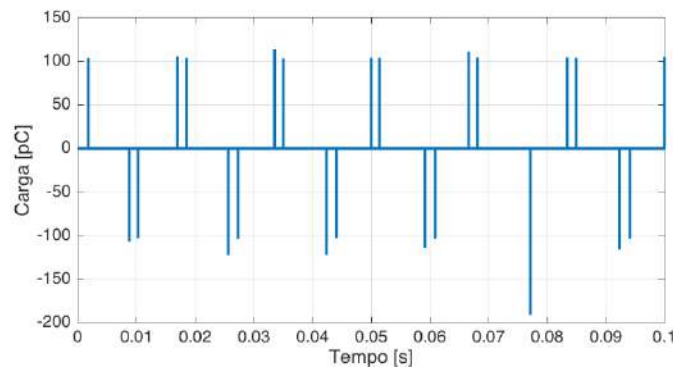


Figura 4-71: Caso 5.2 - forma de onda de carga aparente das DPs.

A Tabela 4-8 apresenta os resultados gerais em função das temperaturas da geometria simuladas.

Tabela 4-12: Caso 5 - resultados gerais.

Resultado	Temperatura da geometria [°C]		
	20	40	60
Número médio de DPs por ciclo	4,0	4,6	4,5
Carga aparente total média por ciclo [pC]	511,3	502,5	488,8
Carga aparente média por DP [pC]	127,8	109,2	108,6
Intensidade da carga aparente máxima [pC]	272,3	203,9	191,1
Intensidade da carga aparente mínima [pC]	94,7	100,8	102,6

De acordo com os resultados obtidos, percebe-se um aumento no número de DPs por ciclo para os casos 5.1 e 5.2 com relação ao caso base. Para o caso 5.2 o número de DPs por ciclo foi menor que para o caso 5.1, pois apesar de haver aumento da taxa de decaimento das cargas de superfície (τ_{dec}), prevaleceu o efeito do aumento do campo elétrico de ruptura com o aumento da temperatura. Com o aumento de τ_{dec} o atraso para ocorrência da DP é menor, logo para maiores valores de temperatura tem-se menor intensidade da carga aparente máxima. É possível também perceber a dependência da intensidade da carga aparente mínima com os campos elétricos de ruptura e de extinção, como observado no caso 5.3 que apresentou maior valor de intensidade de carga aparente mínima, pois apesar de possuir o maior valor de campo elétrico de extinção, o que tenderia

a reduzir o valor da intensidade de carga aparente mínima, prevaleceu o efeito do aumento do campo elétrico de ruptura.

4.3 Bobina com Cavidade Elipsoidal

Neste item teve-se por interesse verificar a influência da geometria da cavidade no estudo de descargas parciais e, deste modo, foi escolhida a geometria elipsoidal com o intuito de aproximar a cavidade a um defeito causado pelo descolamento na isolamento principal da bobina (delaminação). A Figura 4-72 mostra o esquema para a cavidade com geometria elipsoidal.

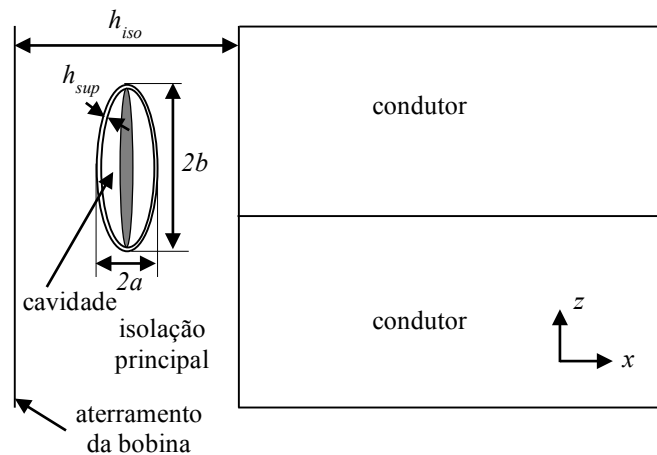


Figura 4-72: Esquema de cavidade com geometria elipsoidal.

A configuração é a mesma utilizada na cavidade esférica, no entanto, para a cavidade elipsoidal existem dois raios de interesse no estudo de descargas parciais, o raio paralelo ao campo elétrico aplicado (a) e o raio perpendicular ao campo elétrico aplicado (b). Nas simulações são comparados os resultados para diferentes valores de b .

A Figura 4-73 apresenta a geometria gerada pelo *software* de elementos finitos para a bobina com uma cavidade elipsoidal.

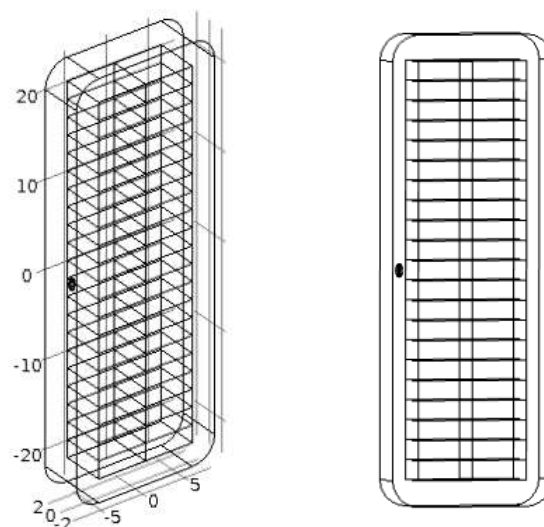


Figura 4-73: Geometria com cavidade elipsoidal.

A geometria da cavidade influencia no fator de intensificação do campo elétrico na cavidade. De acordo com [21] [4] o fator de intensificação, ou seja, o quanto o campo elétrico na cavidade é superior ao campo elétrico no isolamento, depende da permissividade relativa do material isolante e da relação entre os raios paralelo e perpendicular ao campo elétrico aplicado. Na Figura 4-74 é mostrada a variação do campo elétrico no centro da cavidade para um ciclo da tensão aplicada para as cavidades elipsoidal e esférica, considerando a elipsoide com raio paralelo ao campo aplicado igual 0,3 mm e raio perpendicular ao campo aplicado igual a 0,6 mm, e a cavidade esférica com raio de 0,3 mm, em que é possível ver o campo elétrico maior para a cavidade elipsoidal.

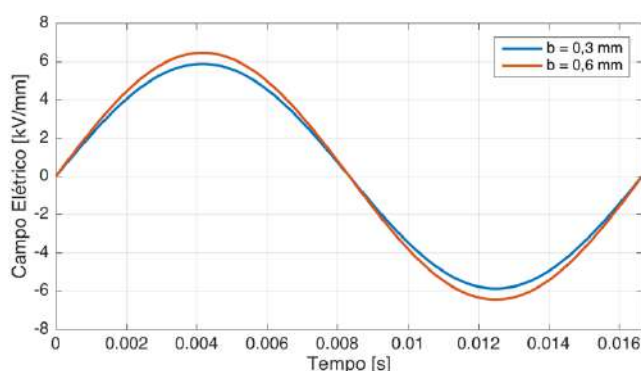


Figura 4-74: Campo elétrico no centro do isolamento..

De acordo com a Equação (3-2) o campo elétrico de ruptura depende do raio paralelo ao campo aplicado, logo neste trabalho, uma vez que é utilizada um elipsoide com raio paralelo ao campo aplicado igual a 0,3 mm, o campo elétrico de ruptura para a geometria elipsoidal é igual ao campo elétrico de ruptura utilizado para a cavidade esférica de 0,3 mm, ou seja, 3,9 kV/mm. Então, com base na Figura 4-74 percebe-se que o campo elétrico no centro da cavidade atinge valores maiores que o campo elétrico de ruptura, portanto, existe a possibilidade de ocorrência da DP. O campo de extinção, nesta dissertação, é considerado como sendo independente dos raios paralelo e perpendicular ao campo aplicado, desta forma, é considerado como sendo igual ao utilizado para a cavidade esférica de 0,3 mm de raio, ou seja, 0,585 kV/mm.

Com o objetivo de verificar a influência da descarga parcial na distribuição das grandezas de interesse na geometria, as figuras a seguir mostram as distribuições de campo elétrico e tensão para dois momentos distintos, exatamente antes e exatamente no final da descarga, para a cavidade elipsoidal com $a = 0,3$ mm e $b = 0,6$ mm. Além disso, são mostrados os resultados de densidade de corrente exatamente antes da DP e exatamente no início da DP, tal como feito na bobina com cavidade esférica. As figuras apresentadas são cortes 2D no plano xz que passa pelo centro da geometria. São apresentadas as distribuições em todo o plano da bobina e também figuras ampliadas na região da cavidade. No modelo é também possível obter curvas com a intensidade da grandeza em uma determinada direção, neste sentido, são apresentadas curvas nas direções x e z próximas da região da cavidade.

A Figura 4-75 e a Figura 4-76 mostram a distribuição de campo elétrico.

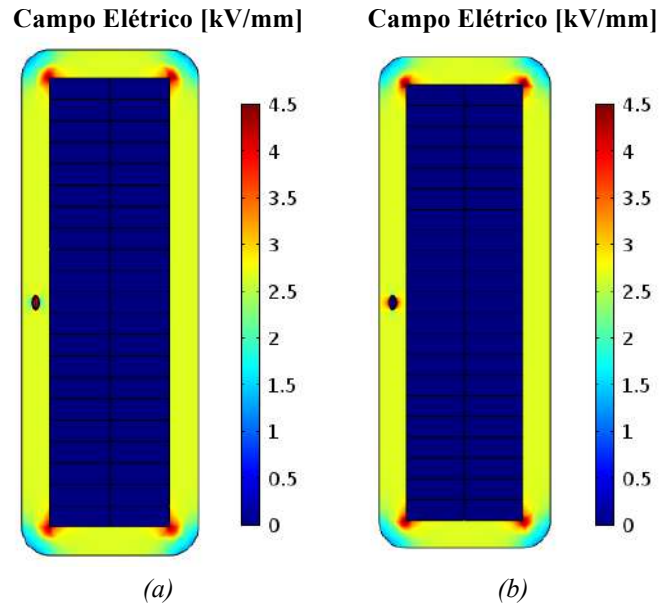


Figura 4-75: Distribuição de campo elétrico: (a) antes da DP; (b) fim da DP.

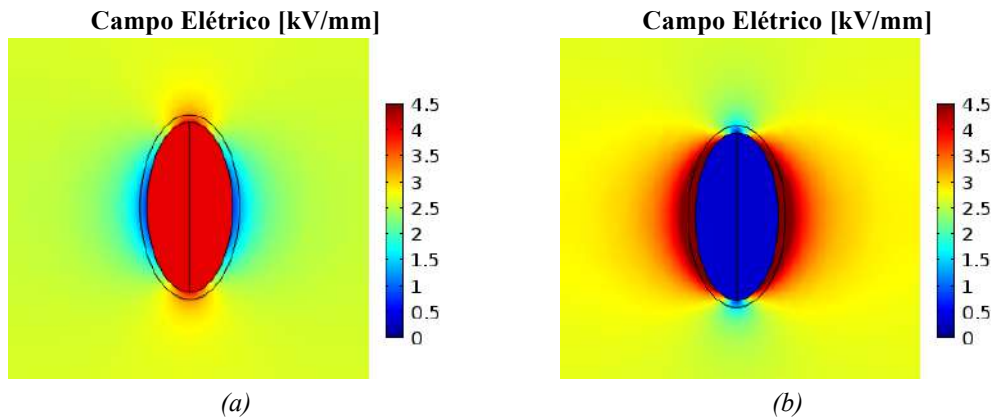


Figura 4-76: Distribuição de campo elétrico (Zoom): (a) antes da DP; (b) fim da DP.

De acordo com a Figura 4-76 percebe-se que exatamente antes da DP o campo elétrico na cavidade é maior que no isolante, tal como já obtido e explanado anteriormente para a cavidade esférica. Além disso, o campo elétrico na cavidade é maior que o campo elétrico de ruptura, atendendo a primeira condição para ocorrência da descarga. Após o término da DP, o campo elétrico no centro da cavidade é inferior ao campo elétrico no isolante e aproximadamente igual ao campo elétrico de extinção, que é a condição de término da descarga parcial.

As mesmas conclusões podem ser também obtidas por meio das distribuições de campo elétrico nas direções x e z, para os instantes antes e no fim da descarga, conforme mostrado na Figura 4-77 e na Figura 4-78.

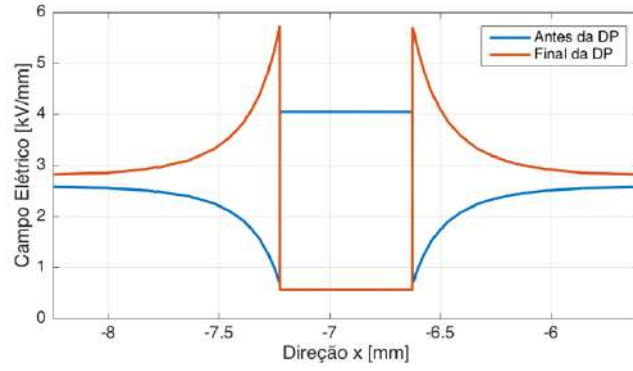


Figura 4-77: Curvas de campo elétrico na direção x .

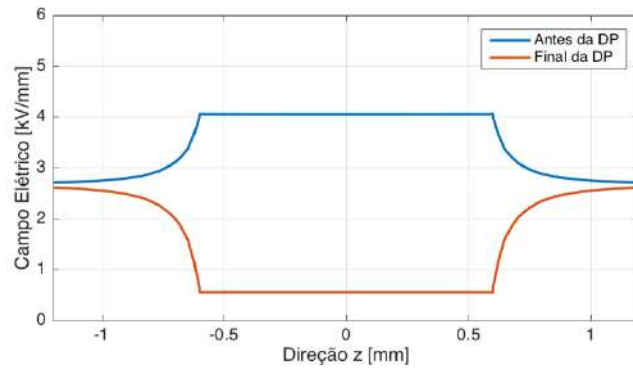


Figura 4-78: Curvas de campo elétrico na direção z .

A Figura 4-79 e a Figura 4-80 mostram a distribuição de tensão.

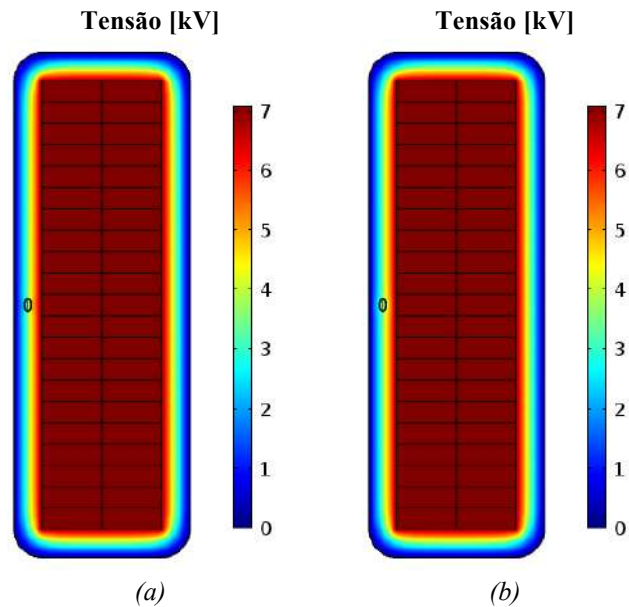


Figura 4-79: Distribuição de tensão: (a) antes da DP; (b) final da DP.

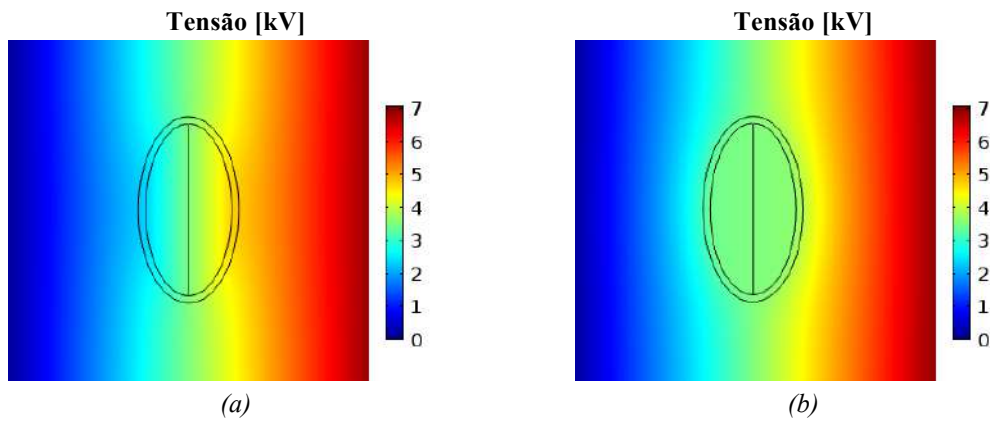


Figura 4-80: Distribuição de tensão (Zoom): (a) antes da DP; (b) final da DP.

De acordo com a Figura 4-79 e a Figura 4-80, antes da DP a cavidade fica submetida a um maior diferencial de tensão quando comparado com o diferencial de tensão no material isolante, no entanto, no fim da descarga ocorre o inverso, ou seja, o material isolante fica submetido a um maior diferencial de tensão, tal como observado para a cavidade esférica. Na Figura 4-81 podem ser obtidas as mesmas conclusões.

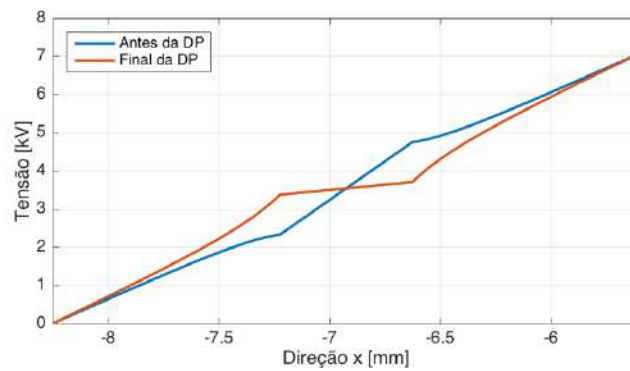


Figura 4-81: Curvas de tensão na direção x .

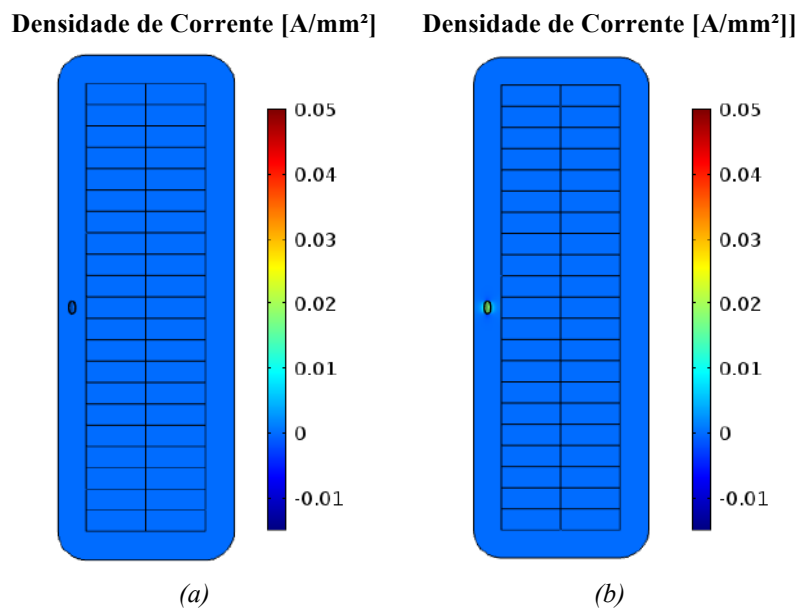


Figura 4-82: Distribuição de densidade de corrente - (a) antes; (b) início da DP.

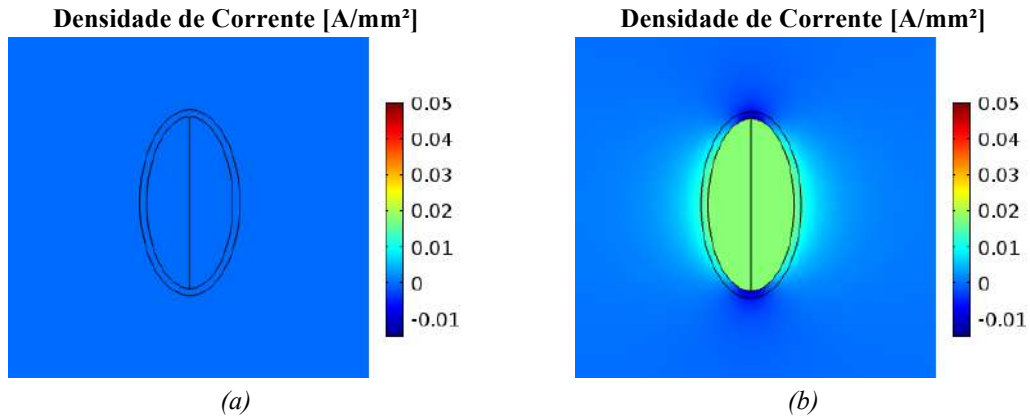


Figura 4-83: Distribuição de densidade de corrente antes e no início da DP (Zoom).

Com relação à distribuição de densidade de corrente, os resultados podem ser vistos na Figura 4-82 e na Figura 4-83. Antes da DP não há corrente, uma vez que a condutividade da cavidade é ajustada como sendo zero. Todavia, no início da descarga, a densidade de corrente atinge seu valor máximo. Na Figura 4-84 e na Figura 4-85 são apresentadas as densidades de corrente exatamente antes e no início da DP nas direções x e z, respectivamente, em que se percebe que para ambos os instantes a densidade de corrente na cavidade, tal como o campo elétrico, é uniforme.

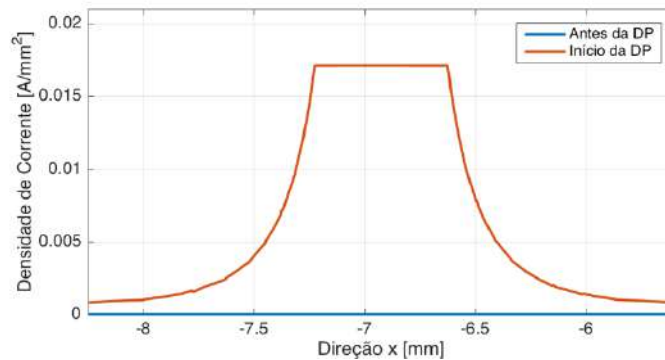


Figura 4-84: Curvas de densidade de corrente na direção x.

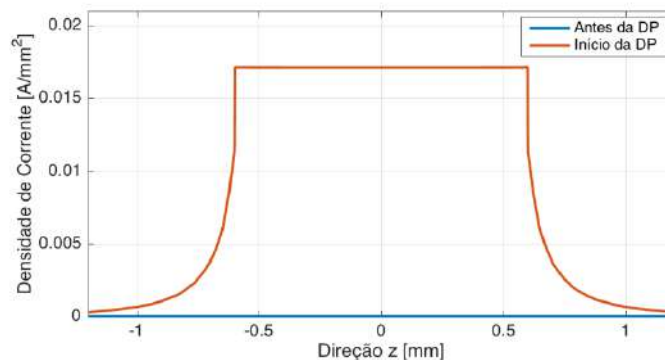


Figura 4-85: Curvas de densidade de corrente na direção z.

4.3.1 Caso 6: alteração da geometria da cavidade

A fim de verificar a influência nos resultados gerais, foram feitas simulações alterando-se a geometria da cavidade, ou seja, foram simulados casos usando a cavidade com geometria elipsoidal. A Figura 4-86 mostra um esquema geral dos casos simulados.

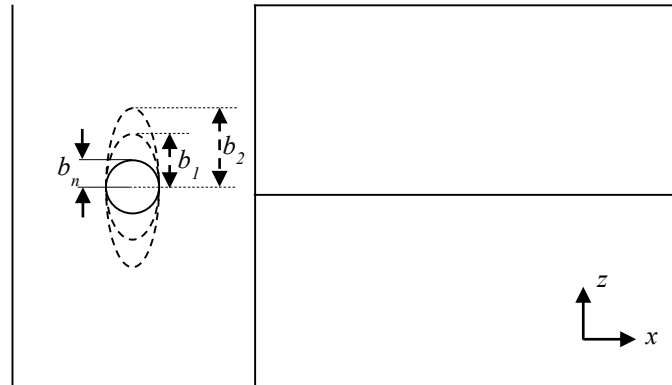


Figura 4-86: Campo elétrico em função da espessura do isolamento.

O caso base para a geometria elipsoidal é o caso em que foi simulado a cavidade esférica de raio 0,3 mm, ou seja, um elipsoide com $a = b = 0,3$ mm. Adicionalmente, foram feitas mais duas simulações em que são alteradas o raio perpendicular ao campo aplicado, isto é, $b_1 = 0,6$ mm e $b_2 = 0,9$ mm.

A Figura 4-87 apresenta a variação da intensidade do campo elétrico no centro da cavidade em função do raio perpendicular ao campo aplicado (b) para $a = 0,3$ mm, quando a tensão aplicada está em seu valor de pico.

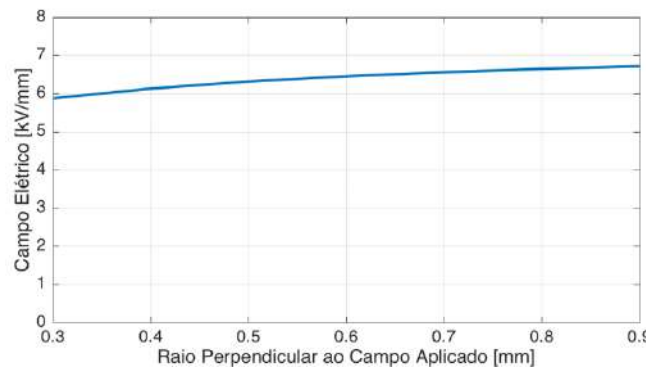


Figura 4-87: Campo elétrico em função do raio perpendicular ao campo aplicado.

De acordo com a Figura 4-87 percebe-se um aumento na intensidade do campo elétrico no centro da cavidade com o aumento do raio perpendicular ao campo aplicado.

Nas figuras a seguir são apresentadas as curvas de campo elétrico e tensão na geometria no instante em que a tensão aplicada possui valor máximo. A Figura 4-88 mostra a alteração da tensão na direção x da geometria para diferentes valores de b , sendo $a = 0,3$ mm.

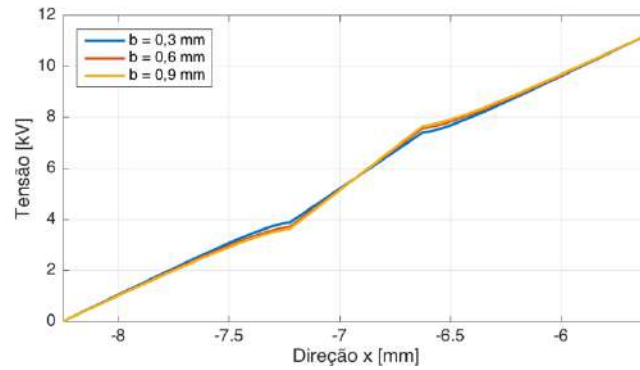


Figura 4-88: Caso 6 - curvas de tensão na direção x.

Do mesmo modo, a Figura 4-89 e a Figura 4-90 mostram a distribuição de campo elétrico, nas direções x e z, respectivamente, para diferentes valores de b , considerando $a = 0,3$ mm.

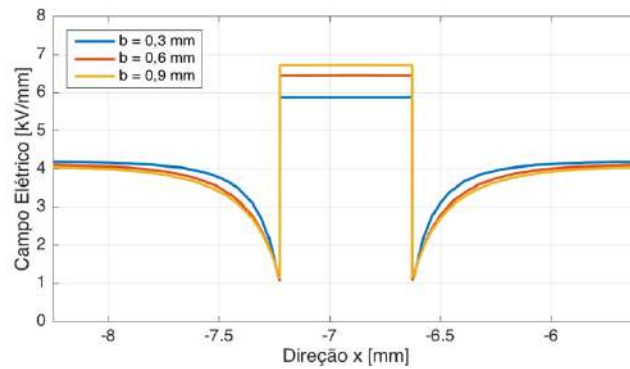


Figura 4-89: Caso 6 - curvas de campo elétrico na direção x.

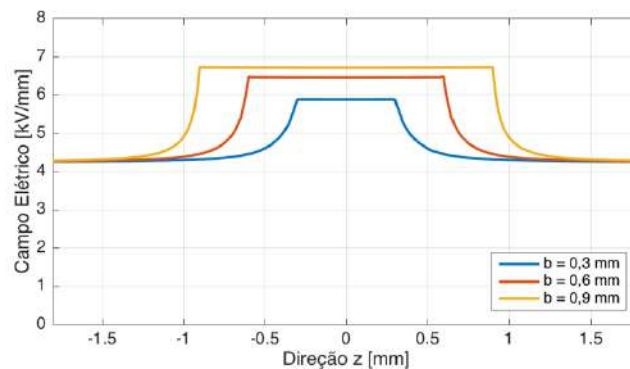


Figura 4-90: Caso 6 - curvas de campo elétrico na direção z

Nas figuras anteriores percebe-se, tal como esperado, o aumento do campo elétrico com o aumento do raio perpendicular ao campo aplicado.

Os parâmetros de simulação utilizados para a obtenção dos resultados gerais para 10 ciclos da tensão aplicada são apresentados na Tabela 4-13.

Tabela 4-13: Caso 6 - parâmetros de simulação.

Parâmetro	Símbolo	Valor
Raio perpendicular ao campo elétrico aplicado [mm]	b	0,3 - 0,6 - 0,9
Espessura da isolamento principal [mm]	h_{iso}	2,65
Amplitude da tensão aplicada [V]	V_{amp}	11267,65
Posição do centro da cavidade [mm]	x	x_n
Raio paralelo ao campo elétrico aplicado [mm]	a	0,3
Campo elétrico de ruptura inicial [kV/mm]	E_{rup}	3,9
Temperatura da geometria [°C]	T_{mat}	20
Campo Elétrico de extinção inicial [kV/mm]	E_{ext}	0,585
Taxa de geração de elétrons devido ao volume [s ⁻¹]	N_v	5,5 - 24,8 - 58,25
Taxa de emissão de elétrons alta [s ⁻¹]	N_{es0A}	14138 - 13622 - 12886
Taxa de emissão de elétrons baixa [s ⁻¹]	N_{es0B}	7159 - 6811 - 6443
Condutividade máxima da superfície[S/m]	σ_{supmax}	$2,14 \cdot 10^{-9}$
Constante de tempo de decaimento de superfície [s]	τ_{dec}	$2 \cdot 10^{-3}$

De acordo com as considerações feitas no capítulo anterior, a taxa de geração de elétrons devido ao volume da cavidade (N_v), depende da tensão de ruptura, a qual é alterada pela geometria da cavidade, e dos raios paralelo e perpendicular ao campo elétrico aplicado. Os valores de N_v são foram novamente calculados com base na Equação (3-28).

As taxas de emissão de elétrons de superfície alta e baixa foram consideradas como dependentes da área da superfície da cavidade, tal como nas simulações do caso 4, e, portanto, variam com a alteração do raio perpendicular ao campo aplicado.

O campo elétrico de ruptura e a condutividade máxima da superfície, de acordo com as considerações feitas, dependem do raio paralelo ao campo aplicado, o qual não varia para as simulações feitas neste caso.

As formas de onda de campo elétrico e de carga aparente, bem como, os resultados gerais são apresentados a seguir. A Figura 4-91 e a Figura 4-92 apresentam as formas de onda para $b = 0,6$ mm (caso 6.1), enquanto que a Figura 4-93 e a Figura 4-94 apresentam as curvas para $b = 0,9$ mm (caso 6.2), para 6 ciclos da tensão aplicada.

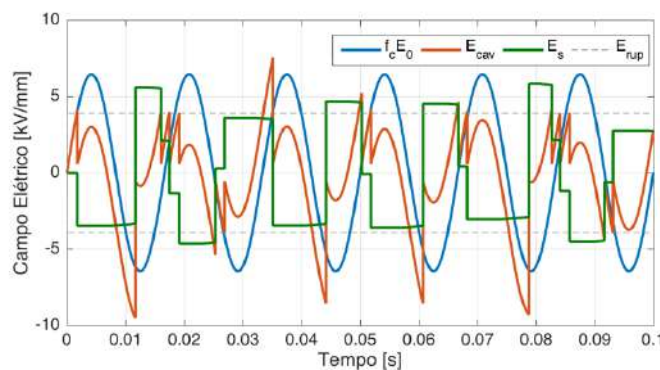


Figura 4-91: Caso 6.1 - formas de onda de campo elétrico.

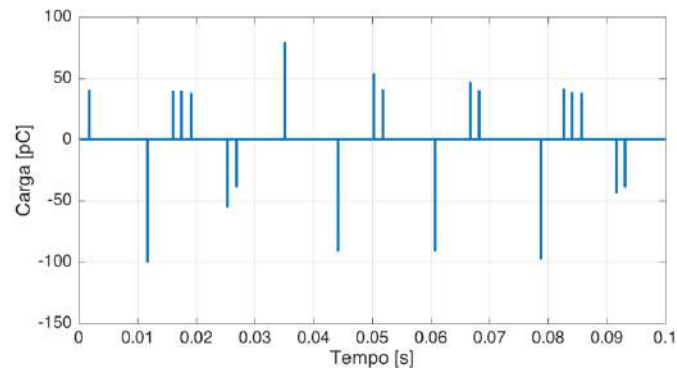


Figura 4-92: Caso 6.1 - forma de onda de carga aparente das DP's.

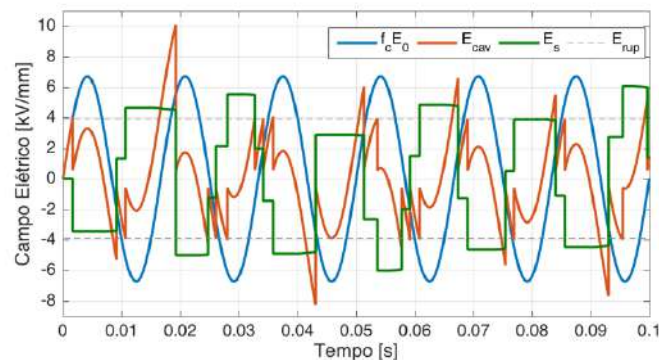


Figura 4-93: Caso 6.2 - formas de onda de campo elétrico.

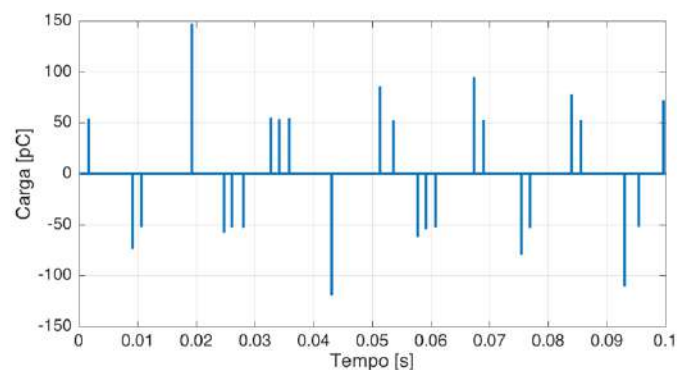


Figura 4-94: Caso 6.2 - forma de onda de carga aparente das DP's.

A Tabela 4-14 apresenta os resultados gerais para as espessuras do isolamento simuladas.

Tabela 4-14: Caso 6 - resultados gerais.

Resultado	Geometria [mm]		
	$a = 0,3$ $b = 0,3$	$a = 0,3$ $b = 0,6$	$a = 0,3$ $b = 0,9$
Número médio de DP's por ciclo	3,0	3,2	3,8
Carga aparente total média por ciclo [pC]	99,2	163,6	255,4
Carga aparente média por DP [pC]	33,1	51,2	67,2
Intensidade da carga aparente máxima [pC]	58,9	100,6	147,3
Intensidade da carga aparente mínima [pC]	23,9	38,4	52,1

De acordo com os resultados apresentados na Tabela 4-14 obteve-se maior número de descargas por ciclo para ambas as simulações com b diferente de 0,3 mm, tendo em vista que o campo elétrico no centro da cavidade é maior para maiores valores do raio perpendicular ao campo aplicado. Tal como verificado para o caso em que se alterou o tamanho da cavidade (caso 4), as intensidades de carga aparente máxima e mínima e por DP são maiores para cavidades maiores, uma vez que a seção transversal da cavidade é maior para maiores valores de b , o que implica em maiores valores de intensidade de corrente na cavidade e, consequentemente, maiores intensidades de cargas real e aparente.

Capítulo 5

5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Neste trabalho é apresentado um estudo acerca do fenômeno de descargas parciais em isolamento de máquinas elétricas, mais especificamente na isolação principal de uma bobina estatórica de tensão nominal igual a 13,8 kV. No trabalho é utilizado um modelo de simulação apresentado anteriormente em [4]. Trata-se de um modelo dinâmico em que as condições de fronteira a cada passo de integração são definidas por um código e por meio do método dos elementos finitos obtém-se as distribuições de campo elétrico, densidade de corrente e densidade de campo elétrico.

Inicialmente é apresentado o modelo em uma geometria cilíndrica simples a fim de entender os princípios utilizados, bem como implementar o código e a modelagem via elementos finitos. Posteriormente o modelo implementado é utilizado em uma geometria 3D da bobina com uma cavidade em sua isolação principal. O objetivo principal do trabalho é verificar a influência de certos parâmetros nos resultados. Desta forma, são feitas simulações alterando parâmetros, tais como, raio, geometria e posição da cavidade, amplitude da tensão aplicada, espessura da isolação principal da bobina e temperatura inicial da geometria.

Com relação às simulações vale destacar que o uso da geometria 3D eleva significativamente o tempo de simulação. Para reduzir o tempo de simulação na geometria 3D, tendo em vista a pequena diferença encontrada em [4], entre os resultados na geometria cilíndrica considerando ou não a elevação de temperatura devido à DP, não foi considerada a elevação de temperatura devido à descarga. Além disso, é importante ressaltar que na geometria 3D é necessário ter um compromisso entre tempo de simulação e refinamento da malha a ser utilizada, uma vez que elementos de malha grandes podem levar a resultados incorretos, no entanto, elementos muito pequenos podem levar a tempos de simulação impraticáveis sem maiores benefícios de precisão.

Os resultados das simulações mostram que o número de descargas por ciclo está diretamente ligado à intensidade do campo elétrico na cavidade, ou seja, para campos elétricos mais intensos na cavidade maior é o número médio de DPs por ciclo e, consequentemente, maior a carga aparente média por ciclo. De acordo com as simulações realizadas percebeu-se aumento do número médio de descargas por ciclo com a redução da espessura da isolação principal, aumento da amplitude da tensão aplicada, aumento dos raios (paralelo e perpendicular) da cavidade e aumento da temperatura inicial da geometria. O aumento do número de descargas por ciclo também foi observado em [4] para os casos em que houve aumento da tensão aplicada e aumento da temperatura, no entanto, para o caso em que houve aumento da cavidade houve redução do número de DPs por ciclo em [4] devido, principalmente, ao fato ter sido utilizada uma cavidade

maior do que as simuladas nesta dissertação, que resultou em uma menor taxa de geração de elétrons devido à emissão de superfície. Com relação à temperatura, em [4] houve aumento do número de DPs para maiores valores de temperatura, logo as diferenças aqui observadas são relacionadas às diferenças nos parâmetros de simulação utilizados.

Com relação à carga aparente da descarga, a qual está diretamente ligada com a intensidade da DP, quando a área da seção transversal da cavidade é maior observou-se maiores valores de carga real e, conseqüentemente, carga aparente. Logo, as maiores intensidades de carga aparente foram observadas para a geometria esférica com a cavidade de maior raio paralelo ao campo aplicado e para a geometria elipsoidal com maior raio perpendicular ao campo aplicado. O aumento da carga aparente também foi observado em [4] nos casos em que houve aumento do raio da cavidade.

Além disso, notou-se também que a intensidade da carga aparente mínima depende dos campos elétricos de ruptura e extinção, bem como da espessura da isolação principal, a qual afeta diretamente a carga aparente.

Ainda assim, é importante ressaltar que os resultados são dependentes dos parâmetros utilizados, tais como, taxa de emissão de elétrons devido à superfície e devido ao volume da cavidade, campo elétrico de ruptura, campo elétrico de extinção, constante de tempo de decaimento das cargas de superfície e condutividade máxima da superfície da cavidade. Em [4] estes parâmetros são obtidos em função da comparação entre simulação e resultados de medição, no entanto, como neste trabalho objetivou-se apenas a realização das simulações, é necessário um estudo mais aprofundado para investigar os valores corretos a serem utilizados nas simulações. Além disso, a fim de evitar que as descargas parem de ocorrer, no modelo utilizado nesta dissertação, considerou-se que caso sejam transcorridos 3 ciclos da tensão aplicada sem a ocorrência da descarga, o código força a ocorrência da DP. Neste sentido, como um trabalho futuro sugere-se efetuar medições em uma bobina real e comparar os resultados com as simulações a fim de se confirmar se os valores utilizados e considerações feitas nesta dissertação estão adequados para a simulação.

Referências Bibliográficas

- [1] THORSEN, O. V., DALVA, M., “Failure Identification and Analysis for High-Voltage Induction Motors in the Petrochemical Industry”, *IEEE Transactions on Industry Applications*, v. 35, n. 4, pp. 810-818, Jul/Ago. 1999.
- [2] Motor Reliability Working Group, “Report of Large Motor Reliability Survey of Industrial and Commercial Installations, Part I”, *IEEE Transactions on Industry Applications*, v. IA-21, n. 4, pp. 853-864, Jul. 1985.
- [3] STONE, G. C., CULBERT, I., BOULTER, E. A., et al, “*Electrical Insulation for Rotating Machines*”, 2ª Edição, Piscataway – Estados Unidos da América, IEEE Press, 2015.
- [4] ILLIAS, H. A., 2011, “*Measurement and Simulation of Partial Discharges within a Spherical Cavity in a Solid Dielectric Material*”. PhD Thesis, University of Southampton, Faculty of Physical and Applied Science - School of Electronics and Computer Science, Shouthampton, Reino Unido, pp. 1-236.
- [5] PAOLETTI, G., GOLUBEV, A., “Partial Discharge Theory and Applications to Electrical Systems”, *IEEE IAS Pulp and Paper Industry Conference*, Seattle, Estados Unidos da América, 1999.
- [6] IEEE Std 286, *IEEE Recommended Practice for Measurement of Power Factor Tip-Up of Electrical Machinery Stator Coil Insulation*, 2006.
- [7] Von Roll, “*Fundamentals of Insulation Technology*”, Von Roll Insulation Training, 2011.
- [8] IEC 60034-27, “*Rotating Electrical Machines – Part 27: Off-Line Partial Discharge Measurements on the Stator Winding Insulation of Rotating Electrical Machines*”, International Electrotechnical Commission, 2006.
- [9] STONE, G., MAUGHAN, C. V., NELSON, D., et. al, “Impact of Slot Discharge and Vibration Sparking on Stator Winding Life in Large Generators”, *Electrical Insulation Magazine*, v. 25, n. 5, pp. 14-21, Set. 2008.
- [10] STONE, G. C., LLOYD, B., SASIC, M., “Experience with Continuous *on-line* Partial Discharge Monitoring of Generators and Motors”, *International Conference on Condition on Monitoring and Diagnosis*, Beijing, China, 2008.
- [11] Centro de Pesquisas de Energia Elétrica – CEPEL, “*Avaliação Dielétrica de Equipamentos de Alta Tensão com base nas Descargas Parciais – Medição em Máquinas Rotativas*”. Disponível em: www.cepel.br. Acesso em: 19 jun. 2016, 19:00.

- [12]AUSTEN, A. E. W., WHITEHEAD, S., “Discharges in Insulation under Alternating-Current Stresses”, *Journal of the Institution of Electrical Engineers – Part I: General*, v. 88, n. 1, pp. 62-64, Jul. 1941.
- [13]ROBINSON, G., “Discharges in Asymmetric Cavities under AC stresses”, *IEEE Proceedings A – Science, Measurement and Technology*, v. 138, n. 2, pp. 119-126, Mar. 1991.
- [14]HIKITA, M., YAMADA, K., NAKAMURA, A., et al., “Measurements of Partial Discharges by Computer and Analysis of Partial Discharge Distribution by the Monte Carlo Method”, *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, v. 25, n. 3, pp. 453-468, Jun. 1990.
- [15]HOZUMI, N., NAGAE, H., MURAMOTO, Y., et al., “Time-lag Measurement of Void Discharges and Numerical Simulation for Clarification of the Factor for Partial Discharge Pattern”, *Proceedings of International Symposium on Electrical Insulation Materials*, pp 29-32, 2001.
- [16]OKAMOTO, T., KATO, T., YOKOMIZU, Y., et al., “PD Characteristics as a Stochastic Process and its Integral Equation under Sinusoidal Voltage”, *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, v. 8, n. 1, pp. 82-90, Feb. 2001.
- [17]SUZUKI, H., AIHARA, K., OKAMOTO, T., “Complex Behavior of a Simple Partial Discharge Model”, *EPL (Europhysics Letters)*, v. 66, n 1, pp. 28-34, 2004.
- [18]PEDERSEN, A., CRICHTON., G. C., MCALLISTER, W., “The Theory and Measurement of Partial Discharges Transients”, *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, v. 26, n. 3, pp. 487-497, Jun. 1991.
- [19]CRICHTON, G. C., KARLSSON., PEDERSEN, A., “Partial Discharges in Ellipsoidal and Spheroidal Voids”, *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, v. 24, n. 2, pp. 335-342, Abr. 1989.
- [20]ACHILLIDES, Z., GEORGHIOU, G., KYRIAKIDES, E., “Partial Discharges and Associated Transients: The Induced Charge Concept versus Capacitance Modeling”, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, v. 15, n. 6, pp. 1507-1516, Dez. 2008.
- [21]NIEMEYER, L., “A Generalized Approach to Partial Discharge Modelling”, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, v. 2, n. 4, pp. 510-528, Ago. 1995.
- [22]BODEGA, R., MORSHUIS, P. H. F., LAZZARONI, M., et. al, “PD Recurrence in Cavities at Different Energizing Methods”, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, v. 53, n. 2, pp. 252-258, Abr. 2004.

- [23] SCHIFANI, G. C., CANDELA, R., ROMANO, P., “On PD Mechanisms at High Temperature in Voids Included in an Epoxy Resin”, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, v. 8, n. 4, pp. 589-597, Ago. 2001.
- [24] MORSHUIS, P. H. F., CAVALLINI, A., MONTANARI, F., et. al, “The Behavior of Physical and Stochastic Parameters from Partial Discharges in Spherical Voids”, *Proceedings of the 6th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials*, China, pp 304-309, 2000.
- [25] FORSSÉN, C., 2008, “*Modelling of Cavity Partial Discharges at Variable Frequency*”. PhD Thesis, Royal Institute of Technology (KTH), Estocolmo, Suécia.
- [26] FORSSÉN, C., EDIN, H., “Field Model of Partial Discharges at Variable Frequency of the Applied Voltage”, *Nordic Insulation Symposium*, Trondheim, Noruega, 2005.
- [27] FORSSÉN, C., EDIN, H., “Influence of Cavity Size and Location on Partial Discharge Frequency Dependence”, *Proceedings of IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, Boulder, Estados Unidos da América, 2004.
- [28] FORSSÉN, C., EDIN, H., “Modeling of a Discharging Cavity in a Dielectric Material Exposed to High Electric Fields”, *Proceedings of FEMLAB Conference*, Estocolmo, Suécia, 2005.
- [29] ILLIAS, H. A., CHEN, G., LEWIN, P., “Comparison of Partial Discharge Measurement and Simulation Results for Spherical Cavities within Dielectric Materials as function of Frequency using Finite Element Analysis Method”, *Conference Record of the 2010 IEEE International Symposium on Electrical Insulation (ISEI)*, San Diego, Estados Unidos da América, 2010.
- [30] ILLIAS, H. A., CHEN, G., LEWIN, P. L., “Effect of Surface Charge Distribution on the Electric Field in a Void due to Partial Discharges”, *Proceedings of International Conference on Electrical Insulating Materials (ISEIM)*, Kyoto, Japão, pp. 245-248, Set. 2011.
- [31] ILLIAS, H. A., CHEN, G., LEWIN, P. L., “Measurement and Modelling of Partial Discharge Behavior in a Spherical Cavity within a Solid Dielectric Material as a Function of Cavity Diameter”, *10th International Conference on Solid Dielectrics*, Potsdam, Alemanha, 2010.
- [32] ILLIAS, H. A., CHEN, G., LEWIN, P. L., “Modeling of Partial Discharge Activity in Spherical Cavities within a Dielectric Material”, *IEEE Electrical Insulation Magazine*, v. 27, n. 1, pp. 38-45, Jan. 2011.
- [33] ILLIAS, H. A., CHEN, G., LEWIN, P. L., “Modelling of Cycle to Cycle Behavior for Partial Discharge Events within a Spherical Cavity in a Solid Dielectric Material

by Using Finite Element Analysis”, *10th International Conference on Solid Dielectrics*, Potsdam, Alemanha, 2010.

- [34] ILLIAS, H. A., CHEN, G., LEWIN, P. L., “Modelling of Partial Discharge Activity in Different Spherical Cavity Sizes and Locations within a Dielectric Insulation Material”, *Proceedings of IEEE 9th International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials*, Harbin, China, 2009.
- [35] ILLIAS, H. A., CHEN, G., LEWIN, P. L., “Modelling of Partial Discharge from a Spherical Cavity within a Dielectric Material under Variable Frequency Electric Fields”, *Annual Report Conference on Electrical Insulation Dielectric Phenomena*, pp. 447-450, Quebec, Canadá, 2008.
- [36] ILLIAS, H., CHEN, G., LEWIN, P. L., “Modelling of Surface Charge Decay in a Spherical Cavity within a Solid Dielectric Material using Finite Element Analysis”, *Proceedings of the 16th Symposium on High Voltage Engineering*, Johannesburg, África do Sul, 2009.
- [37] ILLIAS, H. A., CHEN, G., LEWIN, P. L., “Partial Discharge Behavior within two Spherical Cavities in a Dielectric Material”, *Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP)*, pp. 456-459, Cancun, México, 2011.
- [38] ILLIAS, H., CHEN, G., LEWIN, P. L., “Partial Discharge Behavior within a Spherical Cavity in a Solid Dielectric Material as a Function of Frequency and Amplitude of the Applied Voltage”, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, v. 18, n. 2, pp. 432-443, Abr. 2011.
- [39] ILLIAS, H. A., CHEN, G., LEWIN, P. L., “Partial Discharge Measurements for Spherical Cavities within Solid Dielectric Materials under Different Stress and Cavity Conditions”, *IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, Virginia Beach, pp. 388-391, Estados Unidos da América, 2009.
- [40] ILLIAS, H. A., CHEN, G., LEWIN, P. L., “Partial Discharge Modelling in a Spherical Cavity within a Dielectric Insulation Material as a Function of Frequency”, *IEEE International Insulation Conference*, pp. 55-59, Montreal, Canadá, 2009.
- [41] ILLIAS, H., JIAN, L. T., BAKAR, A. H. A., et. al, “Partial Discharge Simulation under Various Applied Voltage Waveforms”, *IEEE International Conference on Power and Energy (PECon)*, pp. 967-972, Kota Kinabalu, Malásia, 2012.
- [42] ILLIAS, H. A., CHEN, G., LEWIN, P. L., “Modelling of partial discharge behavior in a spherical cavity within a solid dielectric material as a function of temperature”, *2010 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP)*, pp. 1-4, West Lafayette, IN, 2010.

- [43] ILLIAS, H. A., TUNIO, M. A., BAKAR, A. H., et al, "Partial discharge phenomena within an artificial void in cable insulation geometry: experimental validation and simulation", *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, v. 23, n. 1, pp. 451-459, Fev. 2016.
- [44] GUTFLEISH, F., NIEMEYER, L., "Measurement and Simulation of PD in Epoxy Voids", *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, v. 2, n. 5, pp. 729-743, Out. 1995.
- [45] KINDESBERGER, J., LEDERLE, C., "Surface Charge Decay on Insulators in air and Sulfurhexafluoride Part I: Simulation", *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, v. 15, n. 4, pp. 941-948, Ago. 2008.
- [46] CHU, D., WEEDY, B. M., DAVIES, A. E., "Electric Stresses in a HVDC cable through Joint", *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, v. PAS-103, n. 2, pp. 383-388, Fev. 1984.
- [47] WEEDY, B. M., "DC Conductivity of Voltalit Epoxy Spacers in SF6", *IEEE Proceedings A - Physical Science, Measurement and Instrumentation, Management and Education - Reviews*, v. 132, n. 7, pp. 450-454, Nov. 1985.
- [48] OCCHINI, E., MASCHIO, G., "Electrical Characteristics of Oil-Impregnated Paper as Insulation for HV DC Cables", *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, v. PAS-86, n. 3, pp. 312-326, Mar. 1967.
- [49] MCALLISTER, I. W., "Partial discharges in spheroidal voids: void orientation", *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, v. 4, n. 4, pp. 456-461, Ago. 1997.